Aus der Abteilung für Zahnerhaltung
Ärztlicher Direktor: Professor Dr. Dr. P. Riethe
des Zentrums für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde
der Universität Tübingen

KLINISCHE ERFAHRUNGEN MIT DEM MIKROFÜLLER-KOMPOSIT ESTIC MICROFILL®

Entwicklung eines Meßverfahrens nach dem Moiré-Prinzip zur Quantifizierung der Verschleißfestigkeit okklusionstragender Restorationen

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Zahnheilkunde

der
MEDIZINISCHEN FAKULTÄT
(Klinische Medizin)
der Eberhard-Karls-Universität
Tübingen

vorgelegt von

Roland Meint
aus Sibiu/Rumänien

1983

Aus der Abteilung für Zahnerhaltung
Ärztlicher Direktor: Professor Dr. Dr. P. Riethe
des Zentrums für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde
der Universität Tübingen

KLINISCHE ERFAHRUNGEN MIT DEM MIKROFÜLLER-KOMPOSIT ESTIC MICROFILL®

Entwicklung eines Meßverfahrens nach dem Moiré-Prinzip zur Quantifizierung der Verschleißfestigkeit okklusionstragender Restorationen

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Zahnheilkunde

der
MEDIZINISCHEN FAKULTÄT
(Klinische Medizin)
der Eberhard-Karls-Universität
Tübingen

vorgelegt von

Roland Meint
aus Sibiu/Rumänien

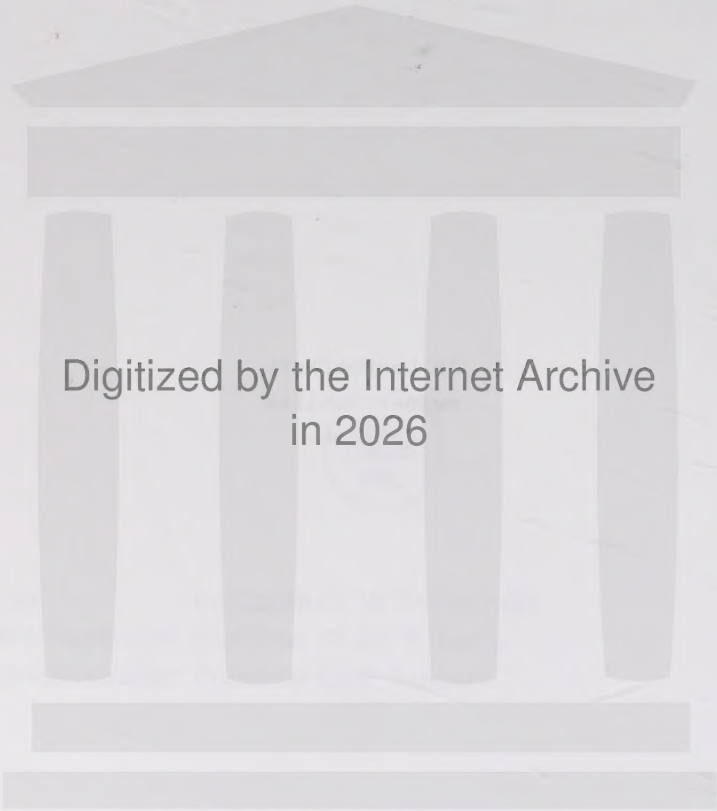
1983

UNIV.
LEIDEN
BIBL.

Dekan: Professor Dr. W. Frommhold
1. Berichterstatter: Professor Dr. Dr. P. Riethe
2. Berichterstatter: Professor Dr. R. Nolden

Offsetdruck Spengler
Lessingstraße 4 · 7401 Neustetten 1
Telefon (0 74 72) 2 21 45

In Dankbarkeit
meiner Familie
gewidmet


Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41547612_0006

Inhaltsverzeichnis

Seite

A) Klinische Untersuchungen mit dem Mikrofüller-Kunststoff ESTIC MICROFILL®

1. Einleitung 1
   1.1 Entwicklung der Füllungskunststoffe 1
   1.2 Adhäsive Restoration 5
   1.3 Kunststoffe im Seitenzahngebiet 6
   1.4 Fragestellung 7
2. Material und Methode 8
   2.1 Komponenten des ESTIC MICROFILL®-Systems 8
   2.1.1 ESPE-Ätzgel 8
   2.1.2 ESTIC GLAZE MICROFILL® (Arbeitstitel) 8
   2.1.3 ESTIC MICROFILL® 9
   2.2 Klinisches Vorgehen beim Legen der Füllungen 11
   2.2.1 Bestimmung der zentrischen Kontakte beim zu versorgenden Zahn 11
   2.2.2 Zahnreinigung 11
   2.2.3 Entfernen der kariösen Zahnhartsubstanzen 11
   2.2.4 Reinigung und Desinfektion der Kavität 12
   2.2.5 Dentinwundverband 12
   2.2.6 Kavitätenpräparation 14
   2.2.7 Anlegen einer Matrize 17
   2.2.8 Relative Trockenlegung 19
   2.2.9 Schmelzvorbehandlung (Conditioning) 19
   2.2.10 Versieglervorstrich 19
   2.2.11 Legen der Füllung 20
   2.2.12 Ausarbeiten der Restorationen 21
   2.2.12 Grobausarbeitung 21
   2.2.12 Feinausarbeitung 22
   2.2.12 Politur 23
   2.3 Herstellung der Replikas zur späteren Verschleißfestigkeitsmessung der Füllungen 26

2.3.1 Abformung der fertigen, polierten Füllungen 26
2.3.2 Ausgießen der Abdrücke und Aufbewahrung der Modelle 27
2.4 Fluoridierung des Behandlungsgebietes 29
3. Eigene Untersuchungen 31
3.1 Klinische Anwendung des Kunststoffes ESTIC MICROFILL® 31
3.2 Nachkontrolle und klinische Qualitätsuntersuchung 33
3.3 Ergebnisse 33
3.4 Diskussion der Ergebnisse 34
3.5 Diskussion des klinischen Vorgehens 35

B) Verschleißfestigkeitsmessung
1. Aufgabenstellung 37
2. Literaturübersicht 38
2.1 Darstellung von Oberflächen in zweidimensionalen Abbildungen 38
2.2 Anwendung der Moirê-Topographie in der Medizin 39
2.3 Methoden zur quantitativen Bestimmung des Substanzverlustes von Zahnfüllungen in vivo 40
3. Verschleißfestigkeitsmessung mittels Moirê-Topographie 40
3.0 Moirê-Topographie 40
3.1 Der Moiré-Effekt 40
3.2 Moirê-Topographie nach TAKASAKI 45
3.3 Aufbau der Meßapparatur 51
3.3.1 Beleuchtung 51
3.3.2 Gitter 52
3.3.3 Kamera und fotografisches Material 53
3.4 Vorbereitung der Modelle zur Fotografie 54
3.5 Justierung und Eichung der Apparatur 58
3.6 Durchführung der Moiré-Fotografie 60
3.7 Auswertung der Aufnahmen 62

3.7.1 Apparatur 62
3.7.2 Justierung der Apparatur 62
3.7.3 Ermittlung der Maßzahlen (Koordinaten der Profilkurven) 64
3.7.3.1 Horizontale Deckung der zu vergleichenden Aufnahmen 64
3.7.3.2 Auffinden von größten Verschleißbereichen 64
3.7.4 Darstellung der Profilkurven und Errechnung der Maxima 65
4. Ergebnisse 71
5. Diskussion 73
5.1 Diskussion der Ergebnisse 73
5.2 Fehlerdiskussion 74
5.3 Diskussion des Meßverfahrens 77

C) Zusammenfassung 80

D) Literaturverzeichnis 82

Anhang 92

A) KLINISCHE UNTERSUCHUNGEN MIT DEM MIKROFÜLLER - KUNSTSTOFF E S T I C M I C R O F I L L ®

1. Einleitung

Die Palette der Kunststoffe für die zahnärztliche Füllungstherapie ist in den letzten Jahren erheblich angewachsen. Der gegenwärtige Entwicklungsstand zeichnet sich durch eine Heterogenität aus, die unschwer darauf schließen läßt, daß ein ideales Produkt noch nicht gefunden ist.
Es steht jedoch fest, daß heute die Silikatzemente als die historisch älteren zahnfarbenen Füllungswerkstoffe durch die Produkte der Polymerchemie verdrängt worden sind (SCHWICKERADT 1977, RIETHE 1978, EICHNER 1981).

Mit einer Retrospektive der wichtigsten Entwicklungsstufen der Kunststoff-Füllungsmaterialien wird einleitend der Versuch unternommen, ihre gegenwärtige Vielfalt transparenter zu machen.

1.1 Entwicklung der Füllungskunststoffe

Das kleine Monomermolekül Methylmethacrylat (MMA) und sein Polymerisationsprodukt Polymethylmethacrylat (PMMA) stehen am Anfang der zahnmedizinischen Kunststoff-Ära.
1936 brachte Kulzer dieses Material in Form des PALADON®-Heißpolymerisats auf den Markt.
In den 40er Jahren erschienen auf dieser Basis die ersten selbsthärtenden Füllungskunststoffe (EICHNER 1981). Die zwei Komponenten Flüssigkeit (Monomer) und Pulver (Vorpolymerisat) erhielten Zusätze von Copolymeren, Katalysatoren und Stabilisatoren und wurden die Vertreter der h e r k ö m m l i c h e n F ü l l u n g s k u n s t s t o f f e.
Das Hinzufügen von organischen Füllstoffen lenkte die Entwicklung in Richtung der nächsten Generation.

Die sogenannten "Resin-Zemente" brachten allerdings noch keine entscheidende Verbesserung, weil die Verbindung Matrix-Füllstoff keine echte, chemische Bindung war (SAUERWEIN 1981).
Seit 1957 gibt die angelsächsische Bezeichnung "Composite" der zweiten Füllungskunststoff-Generation ihren Namen. Die Nomenklatur "als etwas Zusammengesetztes" rührt von dem Zusatz der Füllstoffe her (EICHNER 1981, SAUERWEIN 1981).
Diese sogenannten k o n v e n t i o n e l l e n K o m p o s i t s sind dreidimensionale Mischungen von organischem Kunststoff und mit diesem durch Silanisierung verbundenen, anorganischen, durch Mahlprozesse gewonnenen 0,7 - 100 µm großen Füllern aus Glas, Quarz und Keramik (SCHWICKERADT 1977, LUTZ 1980 c, EICHNER 1981).
Die Bindung Matrix-Füller ist auf den Chemismus der Silane (Siliziumverbindungen) zurückzuführen; es bestehen die Kräfte von Wasserstoffbrücken. Eine zusätzliche mechanische Verankerung in der Matrix wird durch die Füllerform erreicht. Sie variiert zwischen Perl-, Stäbchen- und Splitterform.
Die Materialien wurden durch die Füller nicht nur härter und abrasionsfester, sondern auch transparenter als die bisherigen. Zwischen den verschiedenen Vertretern dieser Kunststoffgruppe gibt es Unterschiede in ihrer chemischen Zusammensetzung und in ihrem chemischen Verhalten. Unwesentlich unterschiedliche Basisharze, unterschiedliche Haftvermittler zwischen anorganischen Füllerteilchen und Basisharz und zum Teil wesentlich unterschiedliche Füllerpartikel erklären die Unterschiede (SCHWICKERADT 1977, TRIADAN 1979, EICHNER 1981).
Die Basisharze erfuhren 1962 durch BOWEN die wichtigste Verbesserung: Das MMA-Molekül wurde durch das Bisphenol A-Glycidmethacrylat (Bis-GMA), ein wesentlich größeres Molekül, ersetzt (SAUERWEIN 1981).
Diese auf der "BOWEN-Formel" beruhenden Kunststoffe (Dimethacrylat-, oder Epoxydbasis) zeichnen sich durch hohe Druckfestigkeit und Härte, sowie geringe Polymerisationsschrumpfung aus.

Der schwerwiegendste Schwachpunkt aller herkömmlichen Komposits ist die organische Matrix. Sie ist verschleißanfällig und verantwortlich für die Phasentrennung in organische und anorganische Strukturelemente bei längerfristiger Beanspruchung des Materials. Bei ihrem exzessiven Verschleiß kommt es zur Freilegung und zum schichtweisen Verlust der anorganischen Füller. Der Destruktionsprozess beginnt allerdings schon mit der Zertrümmerung der anorganischen Füller und deren Herauslösung aus der organischer Matrix (LUTZ 1980 c). Die Füllungen sehen nach extremer Beanspruchung in den Kontaktpunktbereichen wie ausgewaschen aus (SAUERWEIN 1981).
1974 wurden erstmals Komposits hergestellt, bei denen eine Armierung der Vernetzermatrix durch kolloidale Beimischung von ausschließlich amorpher Kieselsäure geglückt war. Als Füllstoff wurde zerkleinertes Vorpolymerisat in Splitter-, Kugel- oder Perlform des gleichen organischen Kunststoffes verwendet, das ebenfalls mit kolloidal zugemischten Mikrofüllerpartikeln auspolymerisiert war (REINHARDT u. VAHL 1977, SCHAEFER 1979, TRIADAN 1979, LUTZ 1980 c, SCHWICKERADT 1977) Der wesentliche Unterschied zu den herkömmlichen Komposits mit der mittleren Teilchengröße von 5 - 10 µm besteht darin, daß diese sogenannten Mikrofüller als Primärteilchen im nicht agglomerierten Zustand im Durchschnitt einen Durchmesser von lediglich 40 nm aufweisen.
Hochglanzpolierbarkeit, Farbkonstanz und eine wesentlich gesteigerte Verschleißfestigkeit zeichnen diese neue Klasse der M i k r o f ü l l e r - K o m p o s i t s aus (MANNERBERG 1977, 1980, RIETHE et al. 1978, LUTZ 1980 c, ROULET et al. 1980, RÜMANN und LUTZ 1980).

LUTZ definiert sie als dreidimensionale Mischungen von organischem Kunststoff und mit diesem durch Silanisierung verbundenem, mikrofeinem anorganischem Füllstoff von 5 bis maximal 700 nm Teilchengröße, vorzugsweise amorpher Kieselsäure mit maximal 70 nm großen Primärteilchen und einer mittleren Teilchengröße von ≤ 40 nm, wobei der anorganische

Füllstoffgehalt in Form von Mikrofüllern im erhärteten Zustand des Komposits ≧ 50 Gew.-% auszumachen hat.
Die Mikrofüller-Komposits sind bis in den Mikrobereich homogen aufgebaut, wobei die Zumischung der Mikrofüller zur Vernetzermatrix direkt kolloidal erfolgt und/oder andererseits die Mikrofüller dem Vorpolymerisat beigemischt und nach dessen Zerkleinerung als "organische" Füller dem Komposit zugeführt werden.
Die jüngsten Kompositkonstruktionen präsentieren sich als gemischt aufgebaute oder hybride Komposits.
Hier fand eine Kombination eines konventionellen Füllersystems und einer durch Mikrofüller verstärkten Vernetzermatrix statt: Die anorganischen Füller sind von einer retentiven Form und lediglich 2 µm groß. Diese Partikel können auch röntgenopak sein (z. B. Bariumglas) (AMEYE 1982).
Die echte Hochglanzpolierbarkeit wird bei dieser Gruppe allerdings aufgegeben. Der Kunststoff soll vorwiegend im Seitenzahngebiet Anwendung finden; hier sind hohe Verschleißfestigkeit und Röntgenopazität wichtiger als eine polierte Oberfläche.

Parallel zu der Weiterentwicklung der einzelnen Kompositbauelemente läßt sich auch eine Modifikation der Verarbeitungsweisen verfolgen.
Die anfänglichen Pulver-Flüssigkeit Systeme bei herkömmlichen Kunststoffen wurden bei den Komposits durch eine Vordosierung in Kapseln optimiert oder hauptsächlich durch Pasten-Pasten-Systeme ersetzt.
Die thixotropen Kunststoffe (= niedrigviskose Komposits in Kapselsystemen) erwiesen sich weniger verschleißfest als die Pasten-Pasten Materialien (LUTZ et al. 1977). Eine bessere Möglichkeit der Formgebung wollte man durch schnitzbare Komposits erreichen. "Schnitzen" ist allerdings nichts anderes als die Bearbeitung in einer extrem viskösen Phase des Abbindens und somit ein in der Kunststoffchemie unübliches Verfahren. Dementsprechend erwies sich auch das Randschluß-

verhalten der Füllungen aus diesem Material als unbefriedigend (ROULET 1976 b).
Neue Wege konnten mit der Einführung photopolymerisierender Einkomponentensysteme beschritten werden (NOLDEN 1980). Strahlungsempfindliche Initiatoren werden zu Radikalen umgewandelt und starten die Polymerisation des Füllungskunststoffes.
Je nach Empfindlichkeit lassen sich U V- u n d l i c h t - h ä r t e n d e K o m p o s i t s unterscheiden. Sowohl herkömmliche Komposits als auch Mikrofüllerkomposits werden als photosensibel angeboten, wobei eine Tendenz zu den tageslichthärtenden Materialien besteht (TRIADAN 1979).

1.2 Adhäsive Restoration

Zu der Frage der Applikationsform aller auf dem Markt befindlicher Komposits gehört auch das Verfahren der A d h ä - s i v e n R e s t o r a t i o n .
Die Anfänge der Schmelzätzung zur Haftverbesserung der PMMA-Kunststoffe am Zahnschmelz durch BUONOCORE liegen über zwanzig Jahre zurück. Seit rund einem Jahrzehnt wird dieser Grundsatz auf die Bis-GMA-Kunststoffe übertragen.
Eine vereinfachte Zusammenfassung gibt die neuen Möglichkeiten der adhäsiven Restoration wieder (LUTZ et al. 1976, TRIADAN 1979):

- Zahngewebeschonende Präparation
- Gewissermaßen "Verlagerung" der Retention vom Inneren der Kavität in die äußeren Randbereiche durch flächenhaftes Abschrägen der Schmelzränder und Ätzen. Es bildet sich eine Art Federrand mit Verbesserung der Randspaltsituation
- Weitere Steigerung der Adhäsion durch Zwischenschaltung eines dünnflüssigen Versieglers zwischen geätzte Schmelzoberfläche und eigentlichem Füllungsmaterial
- Senkung der Füllungsbruchgefahr (Widerstandsform) im Seitenzahnareal durch sehr schmale okklusale Durchzüge
- Belassen der natürlichen "zentrischen" Stops bei okklusalen Füllungen

- Damit gekoppelte geringe Schrumpfung durch die - verglichen mit Blackschen MOD-Restaurationen - kleine Materialmasse.

Die drei letztgenannten Punkte lassen sich allerdings nur an Zähnen mit sehr geringer Kariesausbreitung realisieren. Eindeutig geklärt ist auch die Frage, ob die Zwischenschaltung eines ungefüllten Versieglers zwischen die geätzten, rauhen Schmelzbezirke und das Füllungskomposit als mechanischer Haftvermittler nötig ist. Bei genügend dünnflüssigen Kunststoffen fließt das Material in die angeätzten Schmelzvertiefungen gut ein, bei zähflüssigen bedarf es eines Versieglervorstriches, um eine optimale Haftvermittlung zu erreichen.

1.3 Kunststoffe im Seitenzahngebiet

Das zunehmende orale "Schönheitsbewußtsein" der Bevölkerung verstärkt den Wunsch der Patienten nach ästhetisch einwandfreien Füllungen nicht nur im Frontzahnbereich, sondern auch im Seitenzahngebiet.
Kann das derzeitige Material und die bisher evaluierten Applikationsverfahren das Amalgam aus den okklusalen oder okklusoapproximalen Kavitäten verdrängen?
Der heutige Wissensstand stellt folgende Qualitätsansprüche:

- Amalgamähnliche Verschleißfestigkeit
- Formstabilität: keine plastische oder elastische Deformation
- Im Vergleich zu Amalgam deutlich verbesserte marginale Adaptation
- Für die Erkennung von Imperfektionen ausreichende Röntgenopazität
- Technisch einfache Verarbeitung
- Einfache, gegenüber Schmelz nondestruktive Ausarbeitung
- Zahnähnliches Aussehen ohne Farbänderungs- oder Verfärbungstendenzen (LUTZ 1980, RÜMANN und LUTZ 1980, AMEYE 1982).

Auf Grund der bis heute verfügbaren klinischen und experimentellen Resultate steht fest, daß die konventionellen Komposits als Amalgamersatz ungeeignet sind (ROULET 1976 a, RÜMANN und LUTZ 1980).

Bei den Mikrofüller-Komposits und den neuen hybriden Kunststoffen sind nicht mehr die ungenügende Verschleißfestigkeit, Ästhetik oder fehlende Röntgenopazität die Gründe für einen uneingeschränkten Einsatz, sondern die mangelhaften Kenntnisse über die Formstabilität, Schwierigkeiten bei der Verarbeitung und die damit verbundene Unsicherheit bezüglich der marginalen Adaptation sowie die Ausarbeitungsprobleme.

1.4 Fragestellung

Die vorliegende Arbeit beinhaltet eine klinische Studie über das Verhalten des Mikrofüller-Komposits ESTIC MICROFILL® des Herstellers Kulzer & Co. GmbH als Seitenzahnfüllung.
25 Kavitäten der Klasse I und II wurden nach einem modifizierten Verfahren der adhäsiven Restoration mit diesem Kunststoff versorgt und in situ nach 1 Jahr Tragezeit klinisch untersucht.
Ferner gestattete die eigene Entwicklung eines Meßverfahrens nach dem Moiré-Prinzip bei 5 Füllungen die Quantifizierung des Substanzverlustes infolge des attritions- und demastkationsbedingten Verschleißes im Kontaktpunktbereich.

2. Material und Methode

2.1 Komponenten des ESTIC MICROFILL® - Systems

Die Firma Kulzer & Co. GmbH stellte das Versuchsmaterial ESTIC MICROFILL® für Molaren und Prämolaren mit folgenden Komponenten zur Verfügung:
ESTIC GLAZE® als Versieglervorstrich und ESTIC MICROFILL® Pasten als Füllungswerkstoff.
Um eine randspaltfreie Füllung im Sinne der adhäsiven Restoration zu erhalten, wurde zusätzlich eine Schmelzvorbehandlung mit dem Conditioner ESPE-ÄTZGEL® der Firma Espe vorgenommen.
In der Abb. 1 sind alle Komponenten des Systems dargestellt.

2.1.1 ESPE-ÄTZGEL®

Die bei der Säure-Ätz-Technik überlicherweise verwendete 30-40 %ige Orthophosphorsäure liegt hier in einem Ätzgel vor, das zusätzlich dunkel angefärbt ist. Das Gel ist in Schraubtuben abgefüllt, die eine portionsweise Entnahme ermöglichen.
Die Gel-Konsistenz und die Einfärbung erleichtern die Applikation auf begrenzter Fläche.

2.1.2 ESTIC GLAZE MICROFILL® (Arbeitstitel)

Der Versiegler ist ein Zweikomponentenmaterial, bestehend aus Basis-Flüssigkeit und Katalysator. Beide Flüssigkeiten sind klar und liegen in lackähnlicher, niedrig viskoser Form vor.
Zur Verarbeitung gibt der Hersteller an:

Mischungsverhältnis:		1 Tropfen Katalysator/ 1 Tropfen Basis
Mischzeit	:	15 Sekunden
Verarbeitungsbreite:		80 Sekunden (bei 23°C)
Aushärtungszeit	:	130 Sekunden (bei 23°C)

Anmischen und Applikation des gebrauchsfertigen Versieglers erfolgt mit Einmalpinseln (Anhang, S. 93).

2.1.3 ESTIC MICROFILL®

Das eigentliche Restorationsmaterial, das Seitenzahnkomposit ESTIC MICROFILL® wurde in vier verschiedenen Basispasten und einem Katalysator zur Verfügung gestellt:

- ESTIC MICROFILL Basispaste G-opak CH 011
- ESTIC MICROFILL Basispaste U-opak CH 011
- ESTIC MICROFILL Basispaste G CH 011
- ESTIC MICROFILL Basispaste U CH 011
- ESTIC MICROFILL Katalysator 46

Zur Verarbeitung gibt der Hersteller an:

- Mischzeit : 20 Sekunden
- Verarbeitungsbreite: 1 3/4 Minuten (bei 23°C)
- Aushärtungszeit : 3 1/2 Minuten (bei 23°C)

Über die Transparenz liegen folgende Daten vor:

- Farbe G-opak und U-opak: 3 - 4 %
- Farbe G und U : 10 %

ESTIC MICROFILL® ist der Prototyp eines Komposits der Mikrofüller-Generation, bei dem das Vorpolymerisat und die organische Matrix den gleichhohen Mikrofüllergehalt (Siliziumoxid) kolloidal beigemischt enthalten.
Das einwandfrei auspolymerisierte Komposit weist infolgedessen eine Homogenität bis weit in den Mikrobereich auf.

Über den exakten chemischen Aufbau und die Zusammensetzung des Werkstoffes fehlen nähere Angaben.

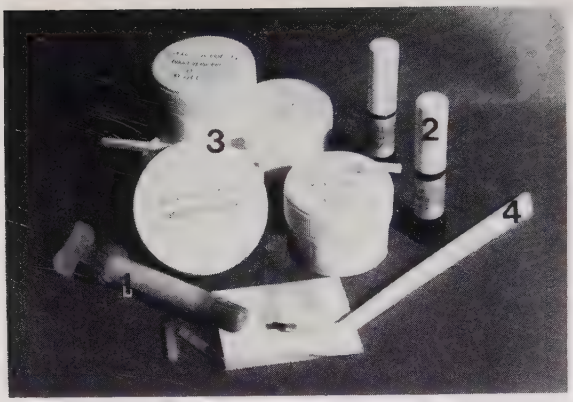


Abb. 1: Die Komponenten des ESTIC MICROFILL®-Systems:

1 = ESPE-ÄTZGEL®, Conditioner

2 = ESTIC GLAZE MICROFILL®, Versiegler
(2 Komponenten)

3 = ESTIC MICROFILL®, Katalysator und Basispasten

4 = Einmalpinsel zur Säure- und Versieglerapplikatio

2.2 Klinisches Vorgehen beim Legen der Füllungen

2.2.1 Bestimmung der zentrischen Kontakte beim zu versorgenden Zahn

Vor der eigentlichen Füllungstherapie erschien es zweckmäßig, mit einer Okklusionsfolie (Anhang, S. 95) zu überprüfen, ob und wo der oder die Antagonisten zentrische Stops markierten. Die vorhandenen Kontaktpunkte sollten anschließend nach Möglichkeit an die physiologisch notwendige Stelle kommen.
Zähne ohne Antagonistenbeziehung in Okklusion wurden nicht in die Versuchsreihe aufgenommen.
Neben den Okklusionskontakten wurden auch die Seitwärtsbewegungen kontrolliert und etwaige störende Hyperbalancen oder Gruppenkontakte durch Beschleifen beseitigt.
Die späteren Restorationen durften an diesen Stellen die Arbeitsbewegungen ebenfalls nicht behindern.

2.2.2 Zahnreinigung

Die Methodik der adhäsiven Restoration fordert eine sorgfältig gereinigte Schmelzoberfläche. Jedwelcher Rückstand auf den Zahnglattflächen kann die spätere Schmelzätzung beeinträchtigen (LUTZ et al., 1976 b).
Nach der Zahnstein- und Belagsentfernung des zu behandelnden Zahnes und seines Nachbarbereichs wurde mit Bimssteinpulverbrei auf rotierendem Nylonbürstchen (Anhang, S. 96) eine saubere Oberfläche erzeugt. Die Interdental- und Approximalflächen konnten mit Strips (Anhang, S. 94) gereinigt werden. Poliergummis, Pasten oder gewachste Zahnseide bieten keine Gewähr, daß nach ausgiebigem Absprayen alle Rückstände entfernt werden.

2.2.3 Entfernen der kariösen Zahnhartsubstanzen

Bei der Entfernung einer alten, insuffizienten Füllung und des kariösen Dentins wurde eine größtmögliche Schonung des gesunden Schmelzes angestrebt. Im Gegensatz zur konventionel-

len Füllungsmethode kann auch unterminierter Schmelz, nach Möglichkeit sogar entkalkte Bezirke, belassen werden; eine zusätzliche Haftung wird dadurch intensiviert (LUTZ et al., 1976 a u. b).
Eine Ausdehnung der Kavität nach den Black'schen Regeln wird bei der adhäsiven Restoration nicht mehr verlangt, da durch die Versiegelung der angrenzenden Schmelzfläche eine Karieshemmung gewährleistet wird (LUTZ et al., 1976 b).

2.2.4 Reinigung und Desinfektion der Kavität

Nach LUTZ et al. (1976 b), sowie BRÄNNSTRÖM und JOHNSSEN (1974) hat sich zur Kavitätenreinigung- und desinfektion CHLORHEXIDIN® bestens bewährt. Die schonendste und effektivste Behandlung des frisch präparierten Dentins, bei der sowohl die Keimzahl in der Kavität reduziert wird, als auch Dentinspäne und Dentinliquor entfernt werden, erreicht man mit einer Konzentration von 0,1 - 0,2 % dieses Desinfektionsmittels.
CHLORHEXIDIN® wurde mit einem Wattepellett auf die Dentinoberfläche gebracht und diese nach ca. 1 Minute mit dem Luftbläser vorsichtig getrocknet.

2.2.5 Dentinwundverband

Bei der Schmelzätztechnik hat die Unterfüllung folgende Funktionen:

- Medikamentöse Versorgung der Dentinwunde
- Schutz des Dentins vor Einwirkung des Conditioners während der Ätzphase. Die Orthophosphorsäure würde sonst die Dentintubuli erweitern und ausräumen; eine starke Zunahme der Dentindurchlässigkeit wäre die Folge (GWINNETT 1973, BRÄNNSTRÖM und JOHNSSEN 1974, LUTZ et al. 1976, BRÄNNSTRÖM 1981).
  (Abb. 2 zeigt den Zustand nach Dentinätzung im Elektronenmikroskop)

- Schutz der Pulpa vor einer eventuellen Materialtoxizität (Monomerschädigung).

Ebenso werden an die Unterfüllungsmaterialien spezifische Anforderungen gestellt:

- Kunstsotffkompatibilität
- Säureresistenz

Bei der vorliegenden Arbeit wurde zur Dentinversorgung ausschließlich der mechanisch mischbare Calciumhydroxid-Zement REOCAP® (Anhang, S. 95) verwendet. Den Untersuchungen von RIETHE et al. (1978) zufolge ist dieses Material pulpaschonend und erfüllt die obengenannten Forderungen.
Am effektivsten bringt man REOCAP® mit einem kleinen Kugelstopfer oder mit der Sondenspitze in die Kavität ein. Das gesamte freiliegende Dentin wird abgedeckt, Überschüsse lassen sich leicht absprengen, wenn das Material erhärtet ist. Durch die Mundfeuchtigkeit wird REOCAP® innerhalb einer Minute fest und bildet eine widerstandsfähige Schutzschicht. Bei sehr tiefen Kavitäten erwies es sich als zweckmäßig, zusätzlich eine Phosphatzement-Unterfüllung zu legen, um einerseits das Kunststoffvolumen der späteren Füllung möglichst klein zu halten (die Polymerisationsschrumpfung bleibt gering) und um andererseits zu vermeiden, daß bei notwendiger Entfernung der Füllung die Pulpa iatrogen eröffnet wird, weil keine Demarkation Kunststoff-Zahn vorlag.

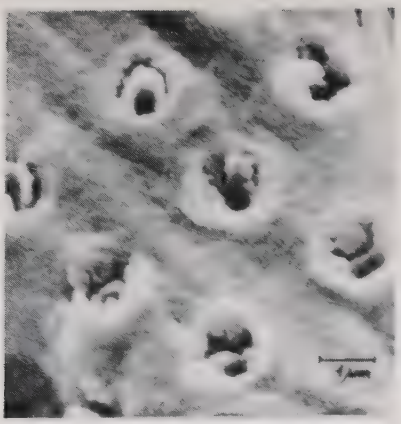


Abb. 1: Rasterelektronenoptische Darstellung angeätzten Dentins:
Die Dentintubuli sind durch Einwirkung von Orthophosphorsäure erweitert und ausgeräumt
(n. RIETHE, P.).

2.2.6 Kavitätenpräparation

Bei der Kavitätenpräparation wurde in allen Fällen von der reinen Adhäsionspräparation, wie sie von LUTZ et al. (1983) angestrebt wird, abgewichen werden. Bei den meisten zu versorgenden Zähnen mußte eine unbrauchbar gewordene Amalgamfüllung entfernt werden und somit stand die Kavitätenform schon fest.
Es galt, diese konventionelle Form zu modifizieren: Unterminierter Schmelz wurde belassen, die Kavitätenecken abgerundet und nach Legen der Unterfüllung die Kavitätenwände im zervikalen Bereich abgeschrägt. Die approximale Stufe und die Approximalflächen erhielten keinen Federrand. Die Matrize verhindert hier nämlich das Ausfließen des Kunststoffes auf diese Partien. Außerdem läßt das meist ungenügende Schmelzangebot im Bereich der zervikalen Stufe

und die unrelevante Dentinhaftung keine andere als die makroretentive, klassische Kastenpräparation zu.
Die Präparation wurde mit Turbine (Anhang, S. 94) und FG-Diamanten (Anhang, S. 93) vorgenommen, die abgeschrägten Ränder mit Winkelstück (Anhang, S. 94) und Finierdiamanten (Anhang, S. 93) oder Arkansas-Steinchen (Anhang, S. 92) nachgearbeitet und finiert.

Die Abb. 3 veranschaulicht die angewandte Kavitätenpräparation. Ihr gegenübergestellt ist Abb. 4. Hier werden alle in Frage kommenden Präparationsarten für okklusoapproximale Kavitäten nebeneinandergestellt.
Am Beispiel der Versorgung des Zahnes 36 (beim Patienten R.J.) wird die Situation nach Dentinwundversorgung und Kavitätenpräparation in Abb. 6 fotografisch dokumentiert.

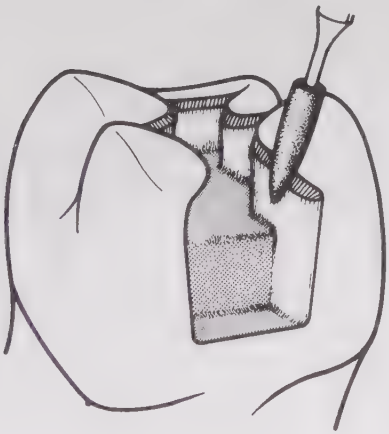


Abb. 3: Modifizierte Adhäsionspräparation zur Aufnahme einer okklusoapproximalen Kunststoffüllung.
Besondere Konstruktionsmerkmale: Abgerundete Kavitätenecken und ein Federrand nur im okklusalen Schmelzbereich

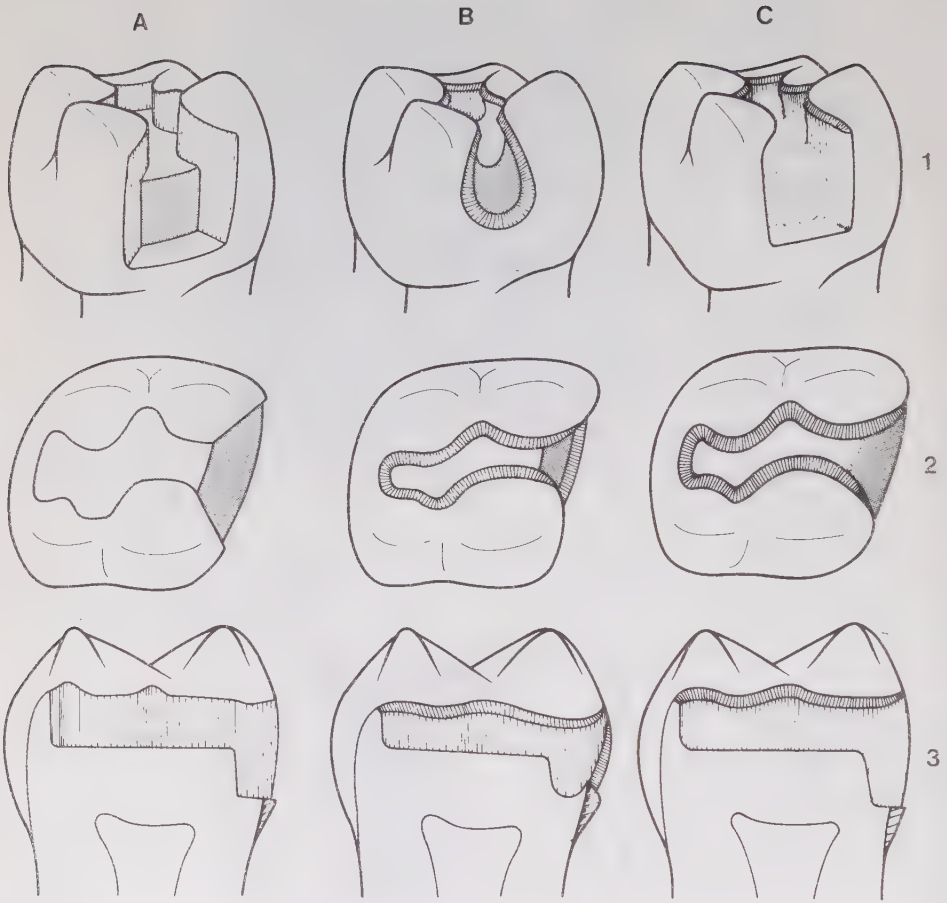


Abb. 4: Präparationsformen für eine okklusoapproximale Füllung:
Spalte A, gängige Kastenpräparation
Spalte B, reine Adhäsivpräparation
Spalte C, modifizierte Adhäsivpräparation
Reihe 1, Ansicht von schräg approximal
Reihe 2, Ansicht von okklusal
Reihe 3, Längsschnitt

2.2.7 Anlegen einer Matrize

Matrizen sind auch bei der adhäsiven Restoration im Seitenzahngebiet ein unerläßliches Hilfsmittel:
Sie ermöglichen zum einen die approximale Formung der Füllung mit überschußfreien approximal-gingivalen Kavitätenrändern und zum anderen eine relative Trockenlegung der Kavität in Verbindung mit Interdentalkeilen.
Unmittelbar vor dem Anätzen angelegt, bietet die Matrize zusätzlichen Schutz vor einem Übergreifen der Säure auf die Nachbarzähne.

Bei der vorliegenden Arbeit wurde das AUTO MATRIX®-Matrizen-System (Anhang, S. 92) verwendet, ein System ohne separaten Halter, das eine einfache, zeitsparende Arbeitsweise erlaubte (Abb. 5).
Die über den Zahn gesetzte Matrize (es gibt davon 4 unterschiedliche Bandgrößen- und stärken) wird mit der AUTO-MATE® Spannvorrichtung gespannt. Dabei zieht sich die Matrize selbständig an und paßt sich dem Zahn exakt an. Zusätzlich bauscht sie sich am approximalen Kontaktpunktbereich aus und schließt am Gingivalrand ab.
Nach Gebrauch wird die Matrize mit einem abgedeckten Seitenschneider entfernt, der die selbstschließende Klemme abknipst.

Besonders wichtig war die Zuhilfenahme von Interdentalkeilen (Anhang, S. 92): Sie boten nicht nur Schutz gegen das approximale Überstopfen und eine Verminderung des Flüssigkeitsstromes aus dem Sulkus in die Kavität, sondern separierten bei entsprechend strammer Verkeilung die Zähne gegeneinander, sodaß ein satter approximaler Kontaktpunkt trotz Polymerisationsschrumpfung des Kunststoffes erreicht wurde, nachdem die Zähne (von Matrize und Interdentalkeilen befreit) in ihre ursprüngliche Lage zurückfederten.

Abb. 5: Das AUTO MATRIX® - Matrizensystem, Darstellung an einem Zahnmodell

2.2.8 Relative Trockenlegung

Von der absoluten Trockenlegung mittels Cofferdam, wie sie bei der adhäsiven Restoration im Frontzahngebiet üblich ist, mußte bei den Klasse I und II Füllungen abgewichen werden. Im Seitenzahngebiet können okkluso-approximale Kavitäten nur nach relativer Trockenlegung gefüllt werden (MEURMANN und HELMINEN 1974, LUTZ et al. 1976 a, RAU 1977). Watterollen (Anhang, S. 92) und verkeilte Matrizen verhinderten die Kontamination der Kavität mit Speichel bzw. mit Sulkusflüssigkeit. Die Feuchtigkeit aus der Atemluft hielten oral ES-Kompressen (Anhang, S. 93), soweit dies möglich war, fern.

2.2.9 Schmelzvorbehandlung (Conditioning)

Nach der Herstellung relativ trockener Bedingungen im Arbeitsfeld konnte mit dem Anätzen des Schmelzes begonnen werden. Das Ätzgel ließ sich gut mit einem feinen Metallinstrument (Spatel oder Kugelstopfer), jedoch noch besser mit einem Einmalpinsel (Anhang, S. 93) auf die angeschrägten Schmelzränder und leicht darüber hinaus auftragen. Nach einer Ätzzeit von 1 Minute (SILVERSTONE 1974, LUTZ et al. 1976 b) wurde die Säure unter ständiger Absaugung ca. 20 Sekunden mit ölfreiem Wasserspray weggewaschen und danach die Kavität gründlich mit dem Luftbläser getrocknet. Die angeätzten Areale erscheinen als weißlich matte Stellen, wenn der Ätzvorgang und das Trocknen lege artis durchgeführt wurden.

2.2.10 Versieglervorstrich

In-vitro-Versuche durch LUTZ (1980 c) machen die Notwendigkeit eines Versieglervorstriches deutlich:
"Die Applikation eines Versieglervorstriches ist unumgänglich, um eine perfekte, randspaltfreie Füllung zu erhalten".

Durch die bessere Benetzung der Kavitätenwand wird die Adaptation von Kunststoffüllungen sowohl bei der Säure-Ätz-Technik, als auch bei konventioneller Kastenpräparation begünstigt.
Nach LUTZ (1980 c) hat der Versiegler an der gesamten approximalen Schmelzfläche noch einen positiven Nebeneffekt: Dank der Kapillarkräfte wird dieses Areal über die angeätzte Schmelzfläche hinaus benetzt und versiegelt und der Entstehung von Sekundärkaries vorgebeugt.

Der nach den Angaben des Herstellers angemischte Versiegler wurde mit einem Einmalpinsel (Anhang, S. 93) aufgetragen. Unmittelbar nach der Lackapplikation wurden die Kavitäten mit dem Luftbläser sanft ausgeblasen, um eine möglichst dünne Versieglerschicht zu erzielen. Die große Polymerisationsschrumpfung des Liners und dessen fehlende Röntgenopazität gestatten nur diese dünne Schicht.

2.2.11 Legen der Füllung

Nach der vorgeschriebenen Anmischzeit von 20 Sekunden wurde das Füllungsmaterial kurz nach der Versieglerapplikation in die Kavität eingebracht. Ein besonderes Applikationsinstrument war nicht notwendig, weil die Mikrofüller-Komposits keine Verfärbung durch herkömmliche Metallspatel erfahren. Es folgte eine leichte Kompression mit einem Wattepellett, um den Kunststoff überall gut zu adaptieren, danach die Abdeckung der überstopften Kaivtät mit einer Polycarbonatfolie (Anhang, S. 95). Während der Aushärtungszeit (sicherheitshalber 5 Minuten) fand eine dauernde digitale Kompression statt.
Die Abdeckung durch eine Folie und die Kompression während des Abbindevorgangs verbessern die Materialeigenschaften des erhärteten Kunststoffes beträchtlich.
Zum einen wird eine Polymerisationsinhibition durch Sauerstoff unmöglich gemacht (FINGER und DREYER JØRGENSEN 1976), zum anderen die Porosität des polymerisierten Materials vermindert (FINGER und DREYER JØRGENSEN 1977).

Bei großen Kavitäten kam ein zweizeitiges Vorgehen zur Anwendung, wie es LUTZ (1980 c) angibt:

- Primär wurden die approximalen Kasten bis auf Höhe des okklusalen Kavitätenbodens gefüllt. Als Stopfhilfe haben sich Wattepelletts auch hier gut bewährt.
- Nach erfolgter Aushärtung wurde die Kavität nach oben beschriebenem Modus vollständig gefüllt.

Durch die etappenweise Insertion läßt sich das Schrumpfungsvolumen der vorangegangenen Portion laufend ausgleichen (LUTZ, 1980 c).

2.2.12 Ausarbeiten der Restorationen

Bei der Ausarbeitung von Kompositfüllungen werden im wesentlichen drei Arbeitsgänge unterschieden:

1. Grobausarbeitung
2. Feinausarbeitung
3. Politur

Die angeführte Reihenfolge ist zur Erzielung einer hochglanzpolierten Füllung aus Mikrofüller-Komposit bei größtmöglicher Schonung des gesunden Schmelzes unbedingt einzuhalten (MÖRMANN et al. 1977, LUTZ 1980 a, b und c).

2.2.12.1 Grobausarbeitung

Bei der angewandten Applikationstechnik ist es klinisch nahezu unmöglich, stets überschußfreie, optimal adaptierte Restorationen zu legen (HIETANEN und RANTANEN 1976, MC CABE und CADDICH 1978, LUTZ 1980 a, b und c).

- Das Komposit benetzt den geätzten und versiegelten Schmelz ideal und fließt unter Bildung von Federrändern bis auf die unpräparierte Zahnoberfläche aus. Die Haftung und überlegene Ästhetik der Adhäsivfüllung sind damit garantiert.
- Die Kompression in den ersten Phasen der Aushärtung wird zur Verbesserung der Adaptation und zur Vermeidung von Poren im Material gebraucht, verstärkt aber die Überschußbildung.

Die Adhäsivfüllungen im Seitenzahngebiet sind demnach durchwegs mit haftenden Überschüssen versehen, die nachträglich abgetragen werden müssen. Die Grobausarbeitung beinhaltet die Entfernung der größten Überschüsse.
NEWESELY und VENZ (1977), wie auch LUTZ (1980 c) empfehlen dazu Wolfram-Carbid Finierer, die hochtourig und unter Wasserspray arbeiten müssen. LUTZ befürwortet auch gewöhnliche Präparierdiamanten, die wegen ihrer guten Schleifleistung dem unter Zeitdruck stehenden Zahnarzt entgegenkommen (LUTZ 1980 c).
Diese relativ groben Schleifkörper beschädigen den Schmelz und sollten deshalb nicht im Bereich der Kavitätenränder eingesetzt werden. Ihr Arbeitsbereich ist ausschließlich das überschüssige Füllungsmaterial.

2.2.12.2 Feinausarbeitung

Hierbei wird der Füllung ihre durch Funktion und Ästhetik bestimmte Form gegeben und in einem weiteren Schritt die Füllungsränder definitiv ausgearbeitet und finiert.
Um Substanzverluste am Schmelz möglichst klein zu halten und Destruktionen im Füllungsbereich zu vermeiden, müssen Konturier- und Finierdiamanten drucklos und locker wischend geführt werden. Es muß unbedingt unter Wasserkühlung gearbeitet werden, da wegen Hitzeentwicklung und Schmiereffekten die Kantenschärfe der Diamanten leidet.

Bei der Feinausarbeitung wurde darauf geachtet, eine möglichst funktionelle Kaufläche zu erzeugen.
Mit Okklusionspapier (Anhang, S. 95) konnten die Kontaktpunkte an physiologische Stellen gelegt werden. Zudem wurde ihre Lage im Erhebungsbogen (Abb. 10) festgehalten, um eine Orientierung über die beanspruchten Füllungspartien bei der späteren Verschleißfestigkeitsmessung zu haben.
Der Arbeitsgang erfolgte mit Winkelstück-Diamanten (Anhang, S. 93),sowie mit weißen Arkansas-Steinchen (Anhang, S. 92). Damit war ein sorgfältiges Finieren unter besonderer Schonung der Schmelzpartien gewährleistet.

Wegen der zahnähnlichen Farbe des Kunststoffes war es für das Auge schwer, den Übergang zwischen Zahn und Füllung genau auszumachen.

2.2.12.3 Politur

Bei den Mikrofüller-Komposits ist das Politurproblem gelöst. Sie sind echt polierbar (MEIER und LUTZ 1979).
Die Homogenität bleibt erhalten, die beim Ausarbeiten erzielte feine Oberflächenqualität besteht weiterhin und eine Tendenz zur Selbstglättung in der Beanspruchung im Mundmilieu wurde beobachtet (REINHARDT und VAHL 1978).

Zur Politur wurde eine schmelzschonende Polierpaste (Anhang, S. 95) verwendet, die - zunächst mit Silikonpolierern (Anhang, S. 95) dann mit Gummikelchen (Anhang, S. 94) appliziert - die Füllung zum Hochglanz brachte.
Die abschließende Kontrolle erfolgte im trockenen Milieu.

Eine Füllung galt als definitiv ausgearbeitet, wenn bei der Sondenprobe kein spürbarer Übergang Füllungsrand-Zahn auszumachen war und die völlig trockene Oberfläche einen echten Hochglanz trug.
Sicherheitshalber erfolgte eine abschließende Kontrolle der okklusalen Kontaktpunkte mit Okklusionspapier (Anhang, S. 95).

Die Abb. 7 dokumentiert den Zustand des Zahnes 36 bei dem Patienten R. J. unmittelbar nach abgeschlossener Politur. Abb. 8 zeigt den Status derselben Füllung nach einer Tragezeit von einem Jahr.

Abb. 6: Status des Zahnes 36 (Patient R. J.) mit abgeschlossener Dentinversorgung und Kavitätenpräparation zur Aufnahme einer mod-Kunststoffüllung nach den Regeln der adhäsiven Restoration.
Die Füllung wurde als Ersatz für eine insuffiziente Amalgamfüllung gelegt.

Abb. 7: Status des Zahnes 36 (Patient R. J.) mit fertig ausgearbeiteter mod-Kunststoffüllung (Markierung der okklusalen Stops).

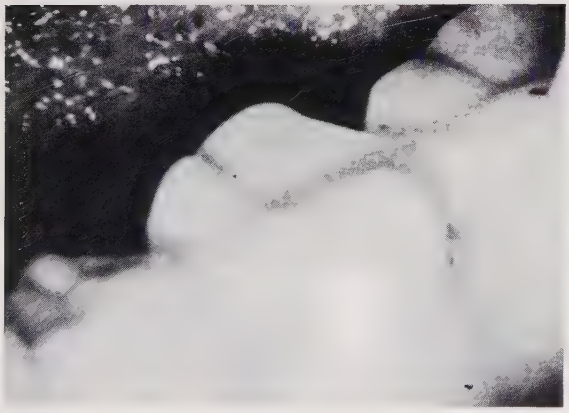


Abb. 8: Status des Zahnes 36 (Patient R. J.) und seiner mod-Kunststoffüllung nach einer Tragezeit von 1 Jahr.

2.3 Herstellung der Replikas zur späteren Verschleißfestigkeitsmessung der Füllungen

2.3.1 Abformung der fertigen, polierten Füllungen

Die definitiv ausgearbeiteten Füllungen wurden in derselben Sitzung mit einem Korrekturabdruck aus Silikonmaterialien verschiedener Viskosität abgeformt. Die Oberflächenreproduktion bezeichnet MEINERS (1977) als gut.
Alle Abdrücke wurden durch den selben Behandler genommen und das Material genau nach den Herstellervorschriften verarbeitet.
Halbe, perforierte Metall-Löffel (Anhang, S. 94), mit einem Haftlack (Anhang, S. 94) beschichtet, dienten dem Einbringen des Erstabformmaterials SILAPLAST® (Anhang, S. 95) in den jeweiligen Quadranten des Gebisses. Eine weitere Optimierung der Abformung erfolgte durch eine gute Trockenlegung der jeweiligen Zähne.
Für den Korrekturabdruck wurde der ausgehärtete Abdruck mit einem Skalpell so beschnitten, daß ein einwandfreies Reponieren möglich war. Vor der Beschickung mit dem niedrigviskösen Material SILASOFT® (Anhang, S. 95) wurde der Erstabdruck mit Wasser und Alkohol gereinigt. Zudem mußten die entsprechenden Füllungen vor dem Abdruck völlig speichelfrei und getrocknet sein.
Nach dem Einbringen des Zweitabdrucks wurde auf den Löffel ein erhöhter Abformdruck über eine Zeitspanne von 5 Sek. ausgeübt, da dies für die Dimensionstreue des Abdrucknegativs von größter Wichtigkeit ist (MEINERS 1977).

Nach einer Reinigung mit Wasser wurde der fertige Abdruck mit freiem Auge geprüft. Bei Mängeln erfolgte eine Wiederholung der Abformung.

2.3.2 Ausgießen der Abdrücke und Aufbewahrung der Modelle

Nach EICHNER (1981) bleibt die initiale Schrumpfung der Abdruckmaterialien nach 2 Stunden konstant, weshalb die Abdrücke erst nach Ablauf dieser Zeit ausgegossen wurden.

Zum Ausgießen wurde ein Spezialhartgips (Anhang, S. 96) verwendet, der sich wegen feiner Zeichnung und guter Lagerfähigkeit am besten zur Replika-Herstellung eignete.
Das Gips-Wasser Verhältnis wurde genau nach den Angaben des Herstellers gewählt, dann 30 Sekunden im Vakuumrührwerk gemischt, und der Gipsbrei schließlich auf dem Vibrator in den Abdruck gebracht.
Am folgenden Tag wurden die Modelle aus den Abdrücken herausgenommen und so zurechtgetrimmt, daß nach Möglichkeit immer ein Zahn vor und einer hinter dem zu untersuchenden Zahn stehen blieb. Abschließend erhielten die Modelle einen Sockel aus Baugips (3 x 2 x 1,5 cm) durch einen selbst hergestellten Sockelformer aus Silikon.
Zur Aufbewahrung gelangten die abschließend beschrifteten Modelle in einen Trockenschrank, mit konstanter Temperatur von 21°C.
Eine minimale Volumenänderung des Gipses konnte jedoch trotz gleichbleibender Lagerung nicht mit Sicherheit ausgeschlossen werden.
In der Abb. 9 sind einige Replikas vor und nach erfolgter Tragezeit zu sehen.

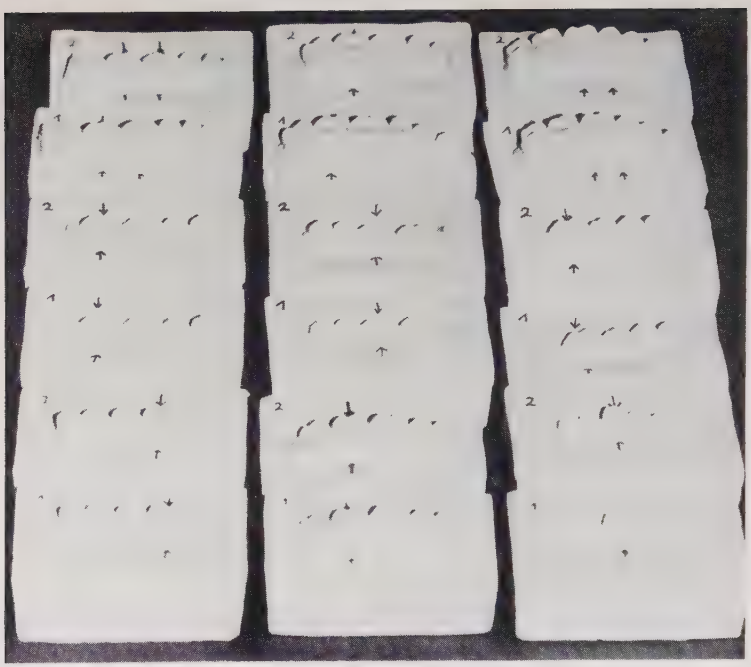


Abb. 9: Beispiel einiger Replikas zur Quantifizierung des Substanzverlustes der Kunststoffüllungen im okklusalen Bereich.
Modell 1 wurde im Anschluß an die Füllungslegung hergestellt, Modell 2 ein Jahr danach. Die Pfeile markieren die behandelten Zähne.

2.4 Fluoridierung des Behandlungsgebietes

Der karieshemmende Effekt einer Adhäsiv-Füllung wird durch eine Fluoridierung des behandelten Zahnes erweitert (LUTZ et al. 1976 b, LUTZ 1977).
Gleichzeitig wird die Reparation des angeätzten, nicht versiegelten Schmelzes beschleunigt.
Die Restoration wurde nach dem Korrekturabdruck nochmals trockengelegt und ihre Ränder mit ELMEX FLUID® (Anhang, S. 93) touchiert. Dieses organische Aminfluorid wird von LUTZ (1977) empfohlen wegen überlegener Schmelzaffinität, starker Ausnivellierung des Ätzmusters und einfacher Applikation.

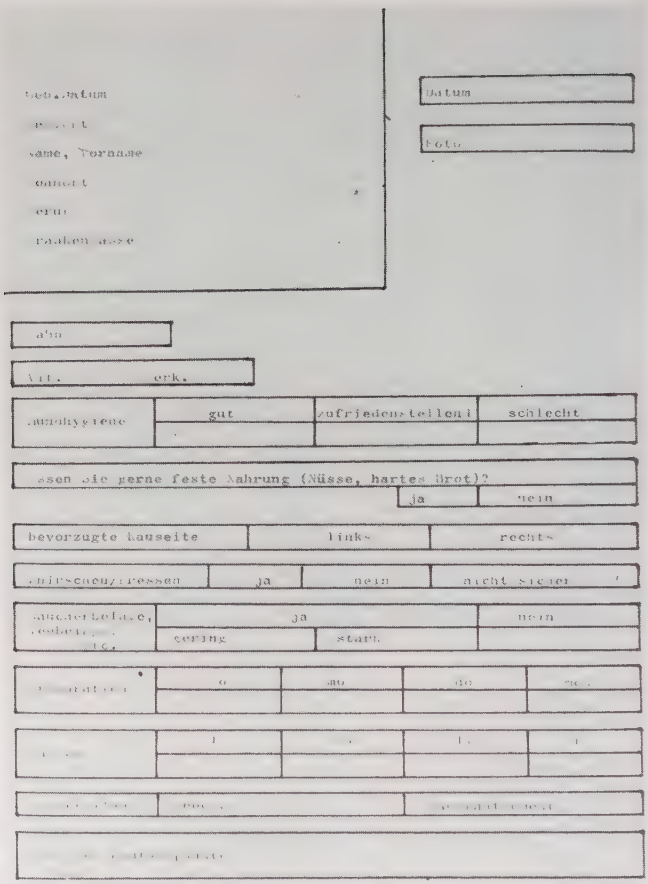


Abb. 10: Erhebungsbogen
Die schriftliche Fixierung der klinischen Daten eines ausgewählten Patienten wurde auf einem selbst konzipierten Erhebungsbogen vorgenommen.

3. Eigene Untersuchungen

3.1 Klinische Anwendung des Kunststoffes ESTIC MICROFILL®

Die Versorgung kariöser Läsionen im Seitenzahngebiet mit dem Füllungskunststoff ESTIC MICROFILL® erstreckte sich auf 25 Zähne. Über die Verteilung und Art der Füllungen geben die Tabellen 1 und 2 einen Überblick.

Vor der Behandlung wurde ein Erhebungsbogen (Abb. 10) ausgefüllt, der vor allem folgende Punkte berücksichtigte:

- behandelter Zahn
- Art der gelegten Füllung (ein-, zwei- oder dreiflächig)
- Okklusionsverhältnisse nach dem Legen der Füllung (Lage der Kontaktpunkte)
- besondere Beanspruchung der gelegten Füllung durch Parafunktionen, bevorzugte Kauseite, Nahrung
- Mundhygiene
- Zahnbeläge

Tab. 1: Verteilung der Füllungen auf die Zahnart

Patienten-anzahl	Anzahl der Füllungen	Anzahl der Prämolaren	Anzahl der Molaren
12	25	7	18

Tab. 2: Übersicht der Art und Anzahl gelegter Füllungen im Seitenzahngebiet mit ESTIC MICROFILL®

Füllungsart	o	mo	do	mod
Füllungsanzahl	3	5	7	10

Vor der restorativen Versorgung, sowie bei jeder Nachkontrolle erfolgte eine Vitalitätsprobe des betreffenden Zahnes mit CO_2-Schnee. Vor der Behandlung reagierten alle Zähne positiv und waren auch bei der letzten Nachuntersuchung ohne negativen Befund.
Als Unterfüllungsmaterial fand immer REOCAP® (Anhang, S. 95) Verwendung. Sehr ausgedehnte Kavitäten wurden - um die Polymerisationsschrumpfung möglichst gering zu halten - zusätzlich mit HARVARD®-Zement (Anhang, S. 94) versorgt.

Tab. 3: Verwendetes Unterfüllungsmaterial bei den 25 Seitenzahnfüllungen

Unterfüllungsmaterial	REOCAP®	REOCAP® und HARVARD®-Zement
Füllungsart		
o (n = 3)	2	1
mo (n = 5)	4	1
do (n = 7)	3	4
mod (n = 10)	5	5
gesamt	14	11

Vor der eigentlichen Behandlung wurden die Patienten in der ersten Sitzung über Mundhygienemaßnahmen unterrichtet und die Mundpflege in den Kontrollsitzungen überprüft.
Von den 12 Patienten hatten 6 eine gute, 5 eine zufriedenstellende und 1 eine schlechte Mundhygiene. Die Beurteilung stützte sich auf subjektive Kriterien entsprechend der Sonden- und Spiegel-Inspektion, Plaque-Tests wurden nicht durchgeführt.

3.2 Nachkontrolle und klinische Qualitätsuntersuchung

Die Nachkontrolle erfolgte nach einem Jahr und bestand aus einer klinischen Qualitätsbegutachtung (nach ausreichender Trockenlegung) mittels Spiegel, Sonde und Okklusionsfolie. Zu späteren Meßzwecken (siehe Teil B) diente die anschließende Abdrucknahme des Untersuchungsquadranten. Die Begutachtung der Komposit-Restorationen geschah nach den folgenden Kriterien:

- Füllungsfrakturen
- Randspalten
- Sichtbare Substanzverluste im okklusalen Bereich
- Okklusale Kontaktpunkte
- Verfärbungen (einzelne farbige Einlagerungen)

3.3 Ergebnisse

Aus den vorliegenden Resultaten konnte Tabelle 4 zusammengestellt werden:

Tab. 4: Ergebnisse nach einem Jahr Nachuntersuchungszeit bei 25 Seitenzahnfüllungen mit ESTIC MICROFILL®

Füllungsart	o	mo	do	mod	gesamt
Begutachtungskriterien					
klinisch unveränderte Füllungen	2	2	7	2	13
Füllungsfrakturen	-	1	-	1	2
Randspalten	-	1	-	-	1
Substanzverlust im okklusalen Bereich	-	1	-	3	4
Verlust des okklusalen Kontaktes	-	1	-	-	1
Punktförmige farbige Einlagerungen	1	1	-	4	6

Das klinische Erscheinungsbild nach einjähriger Beanspruchung einer mod-Füllung am Zahn 36 (Patient R. J.) ist in der Abb. 8 wiedergegeben.

3.4 Diskussion der Ergebnisse

Nach einem Jahr konnten alle gelegten Seitenzahnfüllungen nachuntersucht werden. Es liegt nahe, den Gesamteindruck als gut zu bezeichnen: Von 25 Füllungen waren 13 bei der Prüfung mit Spiegel, Sonde und Okklusionsfolie klinisch unverändert.

Als unbedingt erneuerungsbedürftig erwiesen sich 2 frakturierte Füllungen an Molaren nach einem Monat Inkorporationszeit bei einem Patienten, der durch starke Parafunktionen (Pressen) auffiel. Der Defekt kann sowohl als Folge zu hoher Kontaktpunkte oder als Folge von Verarbeitungsfehlern interpretiert werden. Die zerstörten Restorationen wurden erneuert, sie gelangten jedoch nicht mehr zur Endauswertung.

Bei einer Füllung trat ein tastbarer Randspalt auf. Ein abgesplitterter Federrand deutet an, daß beim Ausarbeiten der Füllung offensichtlich ein Fehler unterlaufen war.

Der Verlust der zentrischen Kontakte wurde nur bei einer Füllung (mittels Okklusionsfolie) festgestellt.

Bei vier Füllungen ergaben sich im okklusalen Bereich sicht- und tastbare Substanzverluste durch verlorene Federränder oder in Form von lokal umschriebenen Einbrüchen in den Attritionszonen.

Die Einbrüche in den Attritionszonen waren schicht- oder kraterförmig, über ihre Entstehung werden folgende Überlegungen angestellt:

- Das Pasten-Pasten System ermöglicht nicht vollständig homogen gemischtes Material
- Beim Anmischen ist ein Einmischen von Luft unumgänglich; diese Lufteinschlüsse machen sich in den obersten Schichten bemerkbar
- In der Polymerisation traten Schwachstellen auf, vielleicht Risse in der Matrix oder Frakturen in den Vorpolymerisatsplittern

Als Demarkationsproblem wurden die abgesplitterten Federränder gewertet: Sie waren bei der Füllungsgestaltung sicherlich über die Präparationsgrenze hinaus belassen worden und brachen später wegen fehlender Haftung an der Zahnhartsubstanz ab. Eine positive Stufenbildung an der entsprechenden Stelle wurde beobachtet und neigte zu Verfärbungen, weil hier eine Plaqueretention begünstigt war.
Einzelne, farbige Einlagerungen in Poren bei sechs Füllungen müssen getrennt gewertet werden. Die Poren sind für Paste-Paste Materialien charakteristisch und sicherlich auch ein Anmischproblem (Vergleiche umschriebene Einbrüche).
Eine Farbänderung der gesamten Restorationen konnte mangels Objektivierbarkeit nicht beurteilt werden.

3.5 Diskussion des klinischen Vorgehens

Beim Legen einer Kunststoffüllung im Seitenzahngebiet steht die Problematik der Verarbeitungstechnik, des Randschlußes, der Ausarbeitung, der Röntgenopazität und der Formstabilität im Vordergrund.
Wenn man die übliche Kariesausdehnung im Seitenzahngebiet berücksichtigt, oder unbrauchbar gewordene Amalgamfüllungen erneuern will, erscheint nur die makroretentive Kastenpräparation zur Erzielung einer guten Füllungsqualität sinnvoll. Zur Verbesserung des okklusalen Randschlußes wird zusätzlich in diesem Bereich eine Adhäsionspräparation angewendet. Säure-Ätz-Technik und ein Versieglervorstrich garantieren eine nahezu randspaltfreie Restoration.
Eine optimale Adaption des Kunststoffes ist nur zu erwarten, wenn er portionsweise - zunächst in die approximalen Kasten der Kavität eingebracht - mit leichtem Druck (Wattepellett) gestopft wird und bei digitaler Kompression unter einer Polykarbonatfolie erhärtet. Die materialspezifische Polimerisationsschrumpfung kann nunmehr nur noch von der freien Oberfläche erfolgen und die approximalen Füllungsränder bleiben davon weitgehend verschont.
Bei dieser Fülltechnik lassen sich allerdings "Überschüsse"

nicht vermeiden und auch die Oberflächenkontur muß erst ausgearbeitet werden. Dieser Arbeitsgang erfordert gegenüber jenem bei einer Amalgamfüllung einige Übung und einen entsprechend hohen Zeitaufwand. Die äußerst schwierige Abgrenzung des Komposits vom natürlichen Zahnschmelz birgt die Gefahr einer Schmelzdestruktion durch die Schleifkörper beim Gestalten der Füllung.
Als nachteilig ist die fehlende Röntgenopazität bei ESTIC MICROFILL® zu werten. Aus diagnostischen und parodontalprophylaktischen Gründen wäre eine Abgrenzung der Füllung im Röntgenbild sehr nötig.
Man sollte sich beim Legen von okklusionstragenden Kunststoffüllungen im Seitenzahngebiet letztlich stets bewußt darüber sein, daß Lebensdauer und Verschleiß sich umgekehrt proportional zu dem Volumen und der Oberflächenausdehnung verhalten (METTLER et al., 1978).

B) VERSCHLEISSFESTIGKEITSMESSUNG

1. Aufgabenstellung

Über den an der Kaufläche auftretenden Materialverlust gibt es verschiedenste Veröffentlichungen und ebenso unterschiedliche Maße für den Verschleiß.
Das Ziel der durchgeführten Arbeit bestand darin, ein Verfahren zu entwickeln, das es ermöglichte, die in-vivo-Abrasion des klinisch untersuchten Kunststoffes ESTIC MICROFILL® durch die Auswertung erzeugter Moiré-Bilder an Gipsreplikas der gelegten Füllungen zu quantifizieren.

Es erscheint zweckmäßig, zunächst den Begriff "Abrasion" einzuordnen: Die DIN-Vorschrift 50320 von 1976 definiert den Verschleiß als "Vorgang eines fortschreitenden Materialverlustes aus der Oberflächenschicht eines festen Körpers, infolge tribologischer Beanspruchungen".
Nach dem heutigen Stand der technischen Erkenntnisse unterscheidet man bei einem tribologischen System vier verschiedene Verschleißmechanismen: Die Adhäsion, die Abrasion, die Oberflächenzerrüttung und tribochemische Reaktionen. Das tribologische System besteht dabei aus einem Grundkörper (Festkörper), einem Gegenkörper (Festkörper), einem Zwischenstoff (Flüssigkeit) und einem Umgebungsmedium (Gas).
Die Abrasion wird demnach als eine bestimmte Form des Verschleißes gesehen, der Verschleiß als Teilbereich der Tribologie. Die Tribologie wiederum beschäftigt sich mit Reibung, Verschleiß und Schmierung.
Aus den neuzeitlichen Auffassungen der Tribologie geht hervor, daß das Verschleißverhalten eines Werkstoffes n u r für die vorhandenen Beanspruchungsverhältnisse Gültigkeit besitzt (WEBER, 1980 a).
Das entwickelte Meßverfahren wählt als Maß für den Substanzverlust den größten Abstand zwischen zwei Profilkurven, die den Oberflächenverlauf an der Stelle des größten angenommenen

Verschleißes darstellen (Erläuterungen, S. 66).

2. Literaturübersicht

2.1 Darstellung von Oberflächen in zweidimensionalen Abbildungen

Kartographische Methoden, wie sie z. B. in der Geodäsie üblich sind, verschlüsseln die dritte Dimension des Raumes in eine zweidimensionale Abbildung mittels Isohypsen. Diese Kurven setzen sich aus Punkten zusammen, die jeweils die gleiche Höhenkoordinate besitzen.
Neben dem plastischen Effekt einer solchen Darstellung, der einem die räumliche Vorstellung der Oberfläche erleichtert, kann durch eine geeignete Zuordnung der Isohypsen in ein Koordinatensystem jede beliebige Raumrichtung in Schnittbildern dargestellt werden.

In der Geodäsie hat die Photogrammetrie zur Auswertung von stereoskopischen Bildern große Bedeutung. Ein Stereokomparator liefert hier sehr genaue Höhenlinienkarten (LACMANN, 1950, SCHWIDEFSKY, 1950, VIERLING, 1965).

Auf dem zahnmedizinischen Sektor sind allerdings nur Verfahren interessant, die eine Darstellung kleiner Objekte ermöglichen. EBERT (1967) sowie STEINHILBER (1970) weichen von der photogrammetrischen Methode ab und erreichen durch die stereoskopische Vermessung der Objekte selbst größere Genauigkeit. Isohypsenbilder mit einer Äquidistanz von 250 Mikrometer benutzte STEINHILBER zur kartographischen Darstellung menschlicher Zahnreihen.

Mit Interferenzmikroskopen kann man nach dem Prinzip der Newton-Ringe Höhenunterschiede im Bereich der Lichtwellenlänge messen. Dieses Verfahren ermöglicht allerdings keine starke Variation der Äquidistanz der Linien und wird bei zahnärztlichen Objekten uninteressant.

Mit Laser-Strahlen lassen sich holographische Aufnahmen von Objekten herstellen; es entsteht ein räumlicher Eindruck beim Betrachter. LENK (1969) erreicht durch eine Variation des Verfahrens Höhenliniendarstellung.

BROOKS und HEFLINGER (1969) sowie TSURUTA und ITOH (1969) erzeugen auf der Objektoberfläche Interferenzstreifen mit zwei Laser-Strahlen und fotografieren diese.

Eine Methode, die man nur auf Außenflächen anwenden kann, ist das Lichtschnittverfahren. LACMANN (1950) projiziert ein streifenförmiges Gitter auf das Objekt derart, daß Punkte gleicher Höhe durch helle Lichtbänder miteinander verbunden sind.

Von TAKASAKI (1970) wird der Moiré-Effekt benutzt, um ein Objekt direkt mit Höhenschichtlinien zu überziehen und zu fotografieren. (Nähere Beschreibung des Verfahrens bei 3.2).

2.2 Anwendung der Moiré-Topographie in der Medizin

Die von TAKASAKI (1970) entwickelte Methode, die er selbst Moiré-Topographie nennt, läßt sich wegen ihrer relativ einfachen Anordnung auch an lebenden Objekten anwenden.
Er zeigt dieses an Moiré-Aufnahmen von menschlichen Gesichtern und Rückenteilen, anhand derer man Asymmetrien der Oberflächenformen erkennen kann.

KECK et al. (1976) berichten über die Herstellung von Gewebeausgleichsfiltern aus Moiré-Topogrammen, die bei der Mantelfeldtechnik zur Strahlentherapie des M. Hodgkin gebraucht werden.

Ein Podometer, welches das Fußgewölbe im Topogramm festhält, konstruierten WINDISCHBAUER et al. (1976). Es findet in der Orthopädie Anwendung, indem krankhafte Fußstellungen doku-

mentiert werden. Im gleichen Institut der Veterinärmedizinischen Universitätsklinik Wien wurde auch ein Verfahren zur Darstellung und Vermessung von Zahnoberflächen erarbeitet, allerdings nur für artvergleichende Zahnuntersuchungen (HOLLER et al., 1978).

TETZLAFF (1978) untersuchte die Anwendungsmöglichkeit der Moiré-Topografie zur qualitativen Analyse zahnärztlicher Modelle und Werkstoffe. Er zeigt ferner Möglichkeiten auf, wie man Moiré-Bilder auch quantitativ analysieren könnte.

2.3 Methoden zur quantitativen Bestimmung des Substanzverlustes von Zahnfüllungen in vivo

Alle angeführten Methoden stehen vor der Schwierigkeit, auf indirekte Messungen (Replikas oder Prothesenzähne) zurückgreifen zu müssen. Es gibt noch keine Möglichkeit, direkte Messungen in der Mundhöhle durchzuführen.

JÖRGENSEN und ASMUSSEN (1978) legten Füllungen an Prämolaren und Molaren von Totalprothesen und hatten so Zugang zur direkten Messung. Die Ergebnisse lagen jedoch deutlich unter den Verschleißwerten anderer Verfahren.

DENNISON et al. (1980) lieferten nur unklare Resultate mit einer Methode, die den Substanzverlust dreidimensional erfaßt, indem der Hohlraum zwischen einem Metallnegativ der definitiv ausgearbeiteten Okklusalfüllung und den zu einem späteren Zeitpunkt genommenen Replikas der in vivo abradierten Füllungsoberfläche ausgegossen wird.

Sehr ähnliche Verfahren wandten auch von GROENINGEN und ARENDS (1982) und HANDELMANN und PAMEIJER (1978) an.

WEBER (1980 b) arbeitete ebenfalls mit Replikas. Die zeitlich gestaffelt hergestellten Gipsmodelle wurden mit buccalen und

palatinalen (bzw. lingualen) Markierungen versehen. Diese legten eine Ebene fest, durch die ein Frontalschnitt definiert wurde. Die Schnitte wurden fotografiert und vergrößert, die Markierungen durch eine Linie verbunden und die Fläche okklusal, d. h. oberhalb dieser Linie, bestimmt. Die zu verschiedenen Zeitpunkten gewonnenen Flächeninhalte wurden zueinander in Bezug gesetzt und aus deren Abnahme das Maß für die stattgefundene Abrasion ermittelt.

POTTS et al. (1976, 1978) arbeiteten an Gipsmodellen mit einem 3-Achsen-Mikrometer; ihre Ergebnisse haben eine Unsicherheit von 15 µm.

JÖRGENSEN et al. (1979) erreichten an Gipsmodellen mit Hilfe der Stereoskopie eine ähnliche Genauigkeit (10 - 15 µm).

METTLER et al. (1978) entwickelten ein Auswertungssystem, dessen Kernstück eine Dreikoordinatenmeßmaschine mit berührungsfreiem vertikalem Meßmikroskop ist. Hier wurde ein Meßfehler von 15 µm angegeben.

MEIER (1977), sowie MEIER und LUTZ (1978, 1979, 1980) ermittelten Verschleißwerte mit einem Tastschnittverfahren. Kupfermodelle der zu untersuchenden Oberflächen wurden mit einem Oberflächenrauhheits-Abtastgerät (Talysurf) untersucht, welches - auf einem X-Y-Schreiber montiert - in der Vertikalen eine 175-fach und in der Transversalen eine 20-fach vergrößerte Aufzeichnung erlaubte. Der Meßfehler wird hierbei mit 6,5 µm angegeben.

3. Verschleißfestigkeitsmessung mittels Moiré-Topographie

3.0 Moiré-Topographie

Bei der Moiré-Topographie werden Objekte mit Höhenschichtlinien überzogen und fotografisch registriert. Aus den Darstellungen werden Maßzahlen ermittelt und rechnerisch ausgewertet.

3.1 Der Moiré-Effekt

Bei der Überlagerung von ähnlichen periodischen Mustern entsteht ein neues Muster. Es wird "Moiré" genannt.
Ein zu Meßzwecken geeignetes Muster ist ein Liniengitter. Auf einer ebenen Fläche sind parallele lichtdurchlässige und lichtundurchlässige Streifen gleichförmig angeordnet. Diese Anordnung ist periodisch, so daß sich immer ein lichtdurchlässiger und ein lichtundurchlässiger Streifen gleicher Breite abwechseln.
Wenn man mit einem feinen Gitter arbeitet und dieses aus einiger Entfernung betrachtet, so besitzt es einen bestimmten Grauwert. Legt man zwei identische Gitter übereinander (Gitterstreifen parallel zueinander), variiert der Grauwert des neuen Moiré-Musters zwischen völlig schwarz und dem Grauwert des Einzelgitters, entsprechend der jeweiligen Phasenverschiebung der Gitter in der Überlagerungszone (Abb. 11).

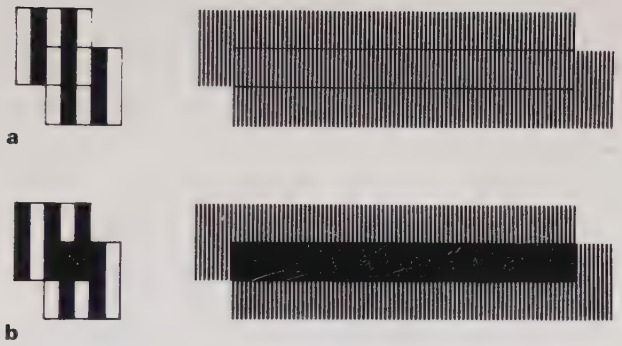


Abb. 11: Auswirkung der Phasenlage zweier identischer Strichgitter zueinander bei Überlagerung:
a) Zwei überlagerte Strichgitter mit gleichen Gitterkonstanten haben eine solche Phasenlage zueinander, daß ihre Gitterstriche genau zur Deckung kommen. Daraus resultiert maximale Helligkeit in der Überlagerungszone.
b) Maximal mögliche Dunkelheit ergibt sich durch eine Phasenlage, bei der die lichtdurchlässigen Streifen des einen Gitters über den lichtundurchlässigen Streifen des anderen liegen.

Ein Moiré-Bild, das durch Überlagerung zweier Gitter mit ungleicher Gitterkonstante entsteht, setzt sich aus allen o. g. Grauwerten zusammen. Dabei treten die dunkelsten und hellsten Zonen als M o i r é - L i n i e n hervor (Abb. 12).

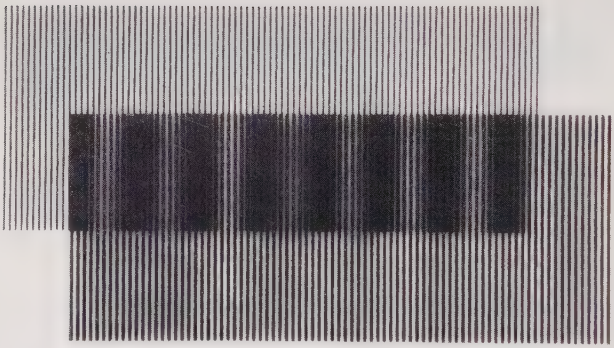


Abb. 12: Moiré-Streifen bei Überlagerung zweier Strichgitter mit unterschiedlicher Gitterkonstanten

3.2 Moiré-Topographie nach TAKASAKI

Wird ein Gitter mit Hilfe einer Lichtquelle auf ein Objekt projiziert (Abb. 13), so entsteht auf dessen Oberfläche ein gitterartiges Muster, dessen lokale Gitterkonstante und Phasenlage durch die Oberflächenstruktur des Objekts bestimmt wird. Betrachtet man dieses aufprojizierte Gitter durch das ursprüngliche Gitter, so entsteht ein Moiré-Bild, d. h. Moiré-Linien, deren Lage unabhängig von der Stellung des Gitters innerhalb der Gitterebene ist (Abb. 14). Die Moiré-Linien sind deshalb invariant gegen Bewegungen des Gitters in der Gitterebene während der Beobachtung. Schaut der Beobachter senkrecht durch das Gitter auf das Objekt und befindet er sich im gleichen Abstand zum Objekt wie die Lichtquelle, dann ist die Lage der Moiré-Linien in einfacher Weise nur durch die Oberflächenstruktur des Objekts gegeben (TAKASAKI 1970).

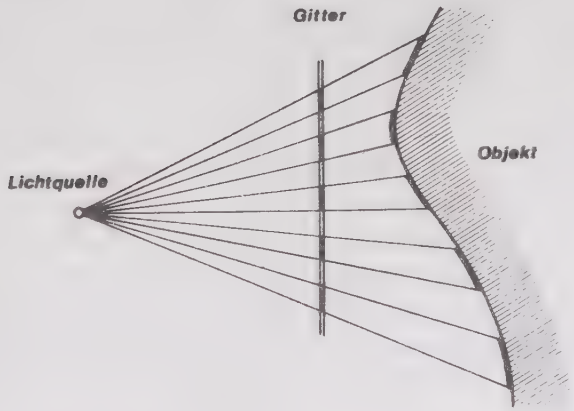


Abb. 13: Schematische Darstellung der Verhältnisse Gitter und Gitterschatten bei Beleuchtung einer Objektoberfläche durch ein Liniengitter.

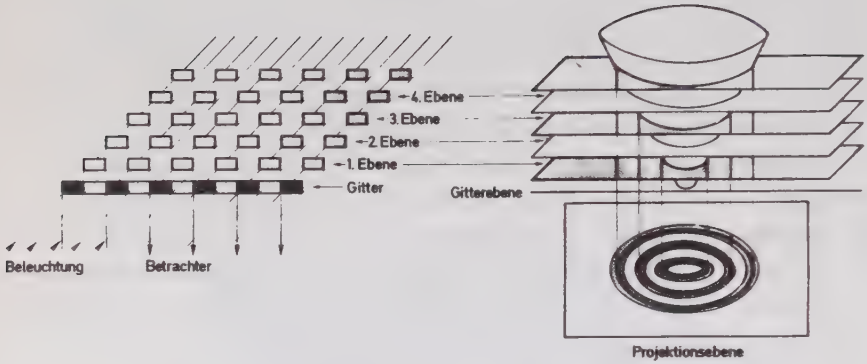


Abb. 14: Vereinfachte Erklärung der Entstehung von Moiré-Streifen auf einem Objekt:
Zu jeder Ebene, die parallel zum Gitter liegt, gehört eine ganz bestimmte Phasenverschiebung des projizierten Gitters. Bei Überlagerung des Gitterschattens mit dem Original ergeben sich verschiedene Helligkeitswerte von maximal möglicher Dunkelheit bei halber Phasenverschiebung bis maximaler Helligkeit bei ganzer Phasenverschiebung. Alle Punkte des Objekts, die in der Ebene mit halber Phasenverschiebung liegen, ergeben die dunklen Moiré-Streifen.

Wegen des endlichen Abstandes Lichtquelle-Gitter ist die Projektion des Gitters auf das Objekt eine Zentralprojektion mit der Folge, daß die Gitterkonstante des projizierten Gitters gegenüber der des ursprünglichen Gitters verändert ist. Andererseits führt der endliche Abstand Beobachter-Objekt dazu, daß die beiden Gitter wegen ihres unterschiedlichen Abstandes zum Beobachter mit unterschiedlichem Abbildungsmaßstab gesehen werden. Die daraus resultierende Verzeichnung führt in beiden Fällen selbst dann zu Moiré-Linien, wenn ein planes Objekt parallel zum Gitter eingesetzt ist; also an und für sich kein Anlaß für Höhenlinien gegeben wäre. Ist der Abstand Lichtquelle-Gitter aber gleich dem Abstand Beobachter-Gitter, so kompensieren sich beide Verzeichnungen.

Eine konsequente mathematische Abhandlung von TAKASAKI (1970) zeigt, daß jede Moiré-Linie jeweils alle Punkte in der Objektoberfläche verbindet, die vom ursprünglichen Gitter gleichweit entfernt sind; zwei aufeinanderfolgende Linien zeigen einen Höhenunterschied von $\Delta h = g \cdot \cot\psi$ an und bei $\psi = 45°$ i. e. $\cot\psi = 1$ gilt: $\Delta h = g$.
(Δh = Höhenunterschied zwischen zwei aufeinanderfolgenden Moiré-Streifen, g = Gitterkonstante, ψ = Einfallswinkel des Lichtes).

Die Höhendifferenz von Punkten auf benachbarten Moiré-Linien ist also bei vorgegebener Beleuchtungseinrichtung nur durch die verwendete Gitterkonstante gegeben, und es bietet sich an, diese Gitterkonstante möglichst klein zu wählen, um mit hoher Empfindlichkeit die Höhendifferenzen messen zu können.

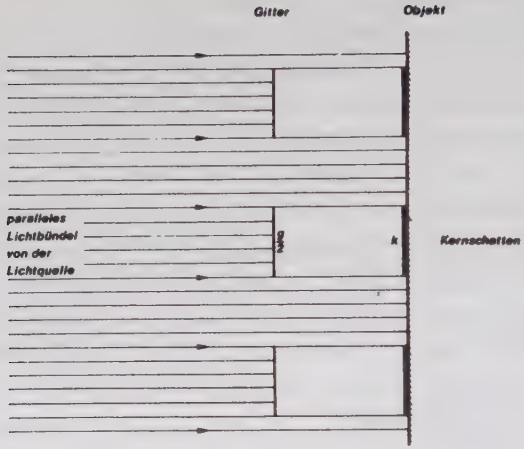


Abb. 15: Idealfall des größtmöglichen Kontrastes, Beleuchtungsanordnung mit Apertur Null

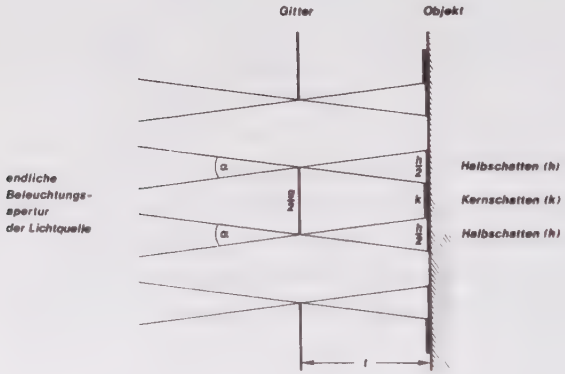


Abb. 16: Verschlechterung des Kontrastes, bei einer Beleuchtung mit endlicher Beleuchtungsapertur α

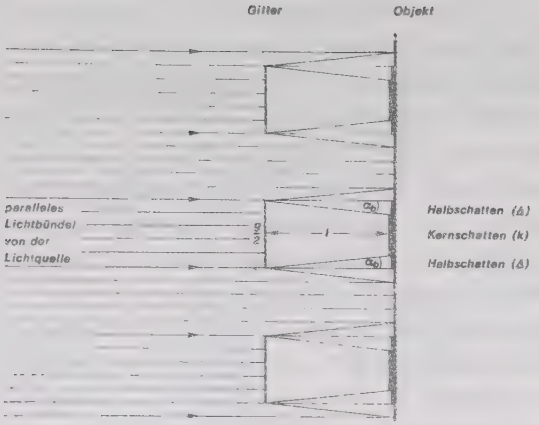


Abb. 17: Verschlechterung des Kontrastes trotz Apertur Null wegen Beugung des Lichtes an den Gitterstegen

2. Das Licht des aufprojizierten Gitters wird von der Objektoberfläche diffus reflektiert. Bildet man die Objektoberfläche mit einer Optik ab, die einen Winkelbereich ß erfaßt (Abbildungsapertur), so erhält man im Bild nur dann Moiré-Linien, wenn sowohl das ursprüngliche Gitter als auch das auf das Objekt im Abstand t aufprojizierte Gitter scharf in dieses Bild abgebildet wird. Dies kann durch Vorgabe einer hinreichend kleinen Abbildungsapertur ß erreicht werden.
Doch läßt sich die Abbildungsapertur nicht beliebig klein wählen: Nach den Gesetzen der Optik wird nur dann ein Gitter im Bild wiedergegeben, wenn $ß \geq \alpha_b$ (Beugungswinkel dieses Gitters) ist. Im Grenzfall $ß = \alpha_b$ ergeben sich dieselben kleinsten Werte für die Gitterkonstante g wie unter 1.

Aus folgenden Gründen kann jedoch die Gitterkonstante nicht beliebig klein gewählt werden:

1. Der auf das Objekt aufprojizierte Gitterschatten muß möglichst scharf sein, damit kontrastreiche und entsprechend gut auswertbare Moiré-Linien entstehen. Dies wird dadurch erreicht, daß die Beleuchtungsapertur α - das ist der Winkel, unter dem vom Gitter aus gesehen die Lichtquelle erscheint - ausreichend klein ist. Will man den Tiefenbereich hinter dem Gitter bis zum Abstand t ausmessen, kann bei vorgegebener Apertur α die Gitterkonstante bis etwa $g \geq 6 \cdot t \cdot \alpha$ ($\approx$120 µm) gewählt werden (Abb. 15 und 16).
Dieser Überlegung liegt die willkürliche Annahme zugrunde, daß der Gitterschatten noch ausreichend Kontrast aufweist, wenn der Kernschatten $\geq 2/3$ von $g/2$ ist (die mathematische Abhandlung des Problems vermittelt der Anhang (S. 97)

Zwar läßt sich die Beleuchtungsapertur α durch eine geeignete optische Abbildung der Lichtquelle mittels entsprechender Linsen und Blenden sehr klein machen, doch ist prinzipiell die Grenze der Gitterkonstanten dadurch gegeben, daß selbst bei Apertur Null durch Beugung des Lichtes der Wellenlänge λ an dem Gitter um den Winkel $\alpha_b = \lambda/g$ (1. Beugungsordnung) der Schatten des Gitters unscharf wird: Gebeugtes Licht trifft in den Kernschattenbereich hinter dem Gittersteg und hellt ihn auf (Abb. 17).
Eine einfache Abschätzung (Anhang, S. 98) zeigt, daß bei einem auszuwertenden Tiefenbereich l des Objektes die Gitterkonstante $g \geq \sqrt{12 \cdot l \cdot \lambda}$ sein muß, damit dieser Effekt nicht stört. Für eine mittlere Lichtwellenlänge λ=0,5 µm und einem Tiefenbereich l = 3 mm ergibt sich deshalb eine kleinste sinnvolle Gitterkonstante von etwa 130 µm.

3.3 Aufbau der Meßapparatur

Entsprechend dieser grundsätzlichen Überlegungen ist die Meßapparatur aufgebaut (Abb. 18):

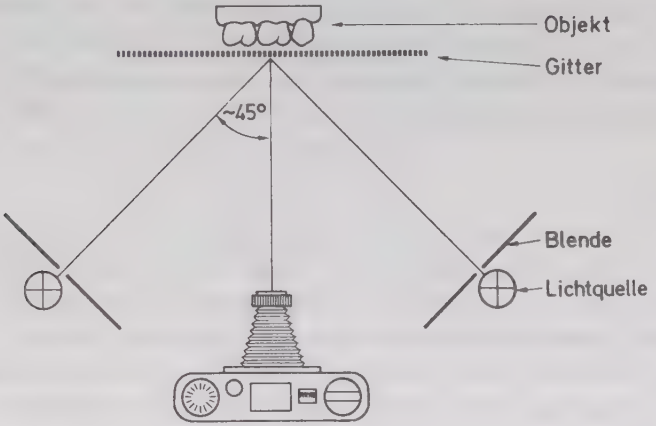


Abb. 18: Apparatur zur Erzeugung der Moiré-Bilder auf einer Zahnoberfläche

3.3.1 Beleuchtung

Zur Beleuchtung des Gitters wird wahlweise einer der beiden Diaprojektoren vom Typ PRADO, Objektiv Typ HEKTOR, 1 : 2,5/ 150 mm (Anhang, S. 93) als Lichtquelle benutzt, in dessen Diaschacht zur Beschränkung der Beleuchtungsapertur in Richtung parallel zu den Gitterstrichen eine Schlitzblende der Breite 1 mm eingesetzt ist. Diese Blende wird in 70 m Entfernung mit einer Breite von 46 cm abgebildet (Willkürliche Einstellung der Objektive). Man erhält auf diese Weise eine Beleuchtungsapertur von 6,6 mrad.

Der große Abstand dieser Lichtquelle zur Meßanordnung Gitter-Objekt bewirkt nahezu eine Parallelprojektion des Gitters auf das Objekt, so daß Fehler in der Messung vernachlässigt werden können, die durch eine eventuelle zentralprojektive Verzeichnung des aufprojizierten Gitters entstehen können. Durch wahlweise Benutzung der beiden Diaprojektoren als Lichtquelle können Abschattungen im interessierenden Objektbereich vermieden werden.

3.3.2 Gitter

Das Gitter ist ein Strichgitter mit der Periode 133 µm, das durch siebenfache lichtoptische Verkleinerung einer Linienraster-Vorlage (Anhang, S. 94) hergestellt wurde. Es ist auf einem Mikroskop-Objektträgerglas fixiert und durch Eingießen in Kunstharz (Anhang, S. 92) gegen Beschädigung geschützt. Die nutzbare Gitterfläche beträgt 2 x 3 cm (Abb. 19).
Die Genauigkeit der Gitterperiode und die Regelmäßigkeit über die gesamte Fläche wurde mit einem Universal-Meßmikroskop (Anhang, S. 95) überprüft.

Abb. 19: Verwendetes Gitter, eigene Herstellung

Dieses Gitter ist auf einem Präzisionsschlitten montiert, der eine Verschiebung des Gitters in der Gitterebene ermöglicht ohne den Abstand des Gitters vom Objekt in störender Weise zu verändern. Da die Lage der Moiré-Linien unabhängig von der Lage des Gitters innerhalb der Gitterebene ist, kann das Gitter während der Aufnahme mit diesem Präzisionsschlitten hin und her bewegt werden, um die Gitterstriche zu verwischen. Lage und Kontrast der Moiré-Linien verändern sich dadurch nicht.

3.3.3 Kamera und fotografisches Material

Zur Abbildung des Objektes und der Moiré-Linien diente eine Kamera vom Typ MIRANDA® mit dem Objektiv NOVOFLEX® Macro 105 (Anhang, S. 95) auf einem Balgengerät. Die Abbildungsapertur kann durch die Blendenöffnungen 4 bis 22 eingestellt werden. Nach ausgedehnten Vorversuchen erwies sich folgendes fotografisches Vorgehen als besonders günstig, um kontrastreiche Moiré-Bilder zu erhalten:

- hart arbeitendes Aufnahmematerial AGFA ORTHO 25® Professional (Anhang, S. 92)
- Belichtungszeit 30 Sek.
- Blende 22
- Entwicklungszeit 2 Min.
- Entwicklerlösung DOKUMOL® (Anhang, S. 93)

3.4 Vorbereitung der Modelle zur Fotografie

Um ein identisches Reponieren der Modelle in die optische Einrichtung zu ermöglichen, wurde ein Verfahren gewählt, das sich an Referenzpunkten orientiert. Zur Festlegung einer Referenzebene, die parallel zur Gitterebene liegt, wurde auf nichttragenden Höckerspitzen des zu untersuchenden und eines Nachbarzahnes eine plane Glasplatte aufgelegt und diese mit Kunststoff und Gips fixiert (Abb. 20).

Die auf diese Weise auf dem Erstmodell hergestellte Verschlüsselung mußte mit den nachfolgenden Modellen paßgenau übereinstimmen. Kam es nicht zu dieser Übereinstimmung, wurde eine neue Bezugsebene festgelegt. Die Kontrolle über das Aufliegen der spiegelnden Glasplatte wurde mit Auge und 12,5 µm dicker Folie überprüft. Die Glasplatte (≙Bezugsebene) wurde auf eine ebenfalls plan geschliffene größere Glasplatte aufgebracht und mit Klebewachs fixiert.

Jedes Modell der Vergleichsserie wurde in den vorgegebenen Schlüssel eingesetzt und an einem Übertragungsrahmen befestigt, der plan auf der großen Glasplatte liegend das Modell umfaßte. Darüber hinaus war die identische Lage des Übertragungsrahmens für jedes Modell durch einen Anschlag an einer Ecke der großen Glasplatte gesichert (Abb. 21).

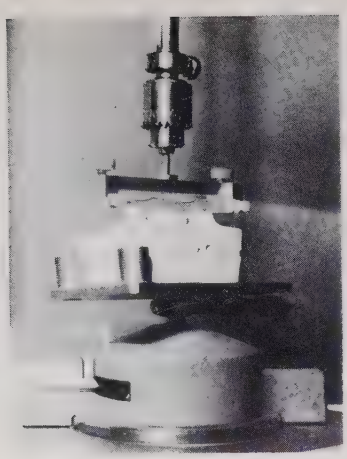


Abb. 20: Festlegung der Referenzebene mit aufgelegter Glasplatte
Zur Arretierung der Glasplatte diente ein Parallelometer (Anhang, S. 95), um eine möglichst exakte Fixierung während des Abbildevorganges der oben genannten Materialien zu gewährleisten

Abb. 21: Übertragungseinrichtung; mit Klebewachs fixiertes Modell im Rahmen

Eine Führung mit Anschlag auf der optischen Bank gewährleistete die Aufnahme des Übertragungsrahmens mit Modell derart, daß die Referenzebene parallel zur Gitterebene justiert wurde und alle Modelle einer Vergleichsreihe in identischer Lage fotografiert werden konnten. Gitter und Rahmen waren parallel zur Filmebene eingestellt. Ein Feintrieb mit horizontaler und vertikaler Einstellungsmöglichkeit brachte den zu untersuchenden Zahn in die gewünschte Stellung zur optischen Achse der Kamera (Abb. 22 und 23)

Nachdem der Zahn des Erstmodells in die Mitte der Abbildung gerückt wurde, erfolgte die Arretierung des Feintriebs, um einer Lageänderung des Rahmens beim Übertragen der nachfolgenden Modelle vorzubeugen (Abb. 22).

Die Genauigkeit des Übertragungsmodus wurde überprüft durch zehnmaliges Reponieren und Fotografieren desselben Modells. Zwischen diesen Aufnahmen konnte mit der später beschriebenen Auswertungsmethode kein Unterschied festgestellt werden.

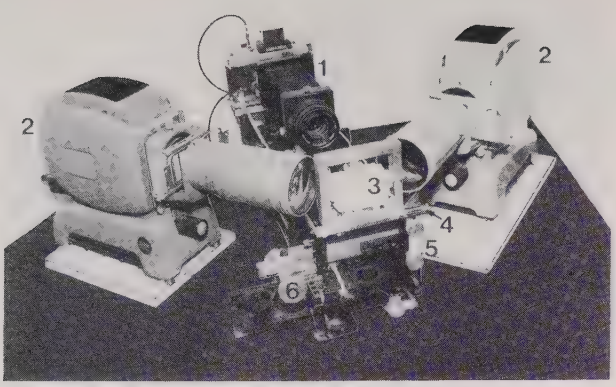


Abb. 22: Übersichtsaufnahme der Apparatur zur Erzeugung von Moirê-Bildern auf der Zahnoberfläche: 1 = Kamera, 2 = Lichtquelle, 3 = Modell im Übertragungsrahmen, 4 = Führung mit Anschlag, 5 = Feintrieb mit Arretierungsteil zur Positionierung des Modells, 6 = Feintrieb zur Bewegung des Gitters

Abb. 23: Detail-Ansicht: 7 = Gitter mit Halterung

3.5 Justierung und Eichung der Apparatur

Nachdem auf einem erschütterungsarmen Tisch Kamera und Beleuchtung in e i n e Ebene gebracht und auf ca. 45° zueinander eingestellt wurden, konnte das Gitter senkrecht zu dieser Ebene sorgfältig auf den Feintrieb montiert werden. Sämtliche wichtigen Parameter der Anlage wurden mit Hilfe von Kunststoff nach ihrer Justierung unveränderbar fixiert.

Zur Eichung dienten Prüfkörper aus Gips. Ihre Herstellung erfolgte nach dem gleichen Verfahren, wie die zu untersuchenden Zahnmodelle. Die Originale waren fünf auf 1 µm genau vermessene Metallkugeln mit unterschiedlichem Durchmesser, sowie ein speziell angefertigtes Werkstück, bei dem zwei parallele Ebenen durch eine schiefe Ebene (Winkel genau 45°) miteinander verbunden sind. Dabei besteht zwischen ihnen eine Höhendifferenz von exakt 2,500 mm. Ferner kam ein Gipskörper mit einer planen Oberfläche zur Anwendung. Die Vermessung der Prüfkörper wurde mit einem Digital-INKREMENTALER Längenzähler, (Anhang, S. 93) Auflösung 1 µm, vorgenommen.

Die auf den Kugeloberflächen erzeugten Moirê-Linien ermöglichten

a) eine genaue Aussage darüber, ob die Moirê-Linien in der von uns untersuchten Tiefenausdehnung echte Höhenlinien darstellen,
b) die Bestimmung Δh (Höhendifferenz zwischen den einzelnen Linien),
c) die Berechnung des Vergrößerungsmaßstabes Original-Diaprojektion,
d) eine statistische Auswertungsgenauigkeit durch Mehrfachmessung.

Mit der schiefen Ebene konnte ermittelt werden,

a) ob in dem zu untersuchenden Tiefenbereich die Moiré-Linien d e u t l i c h sichtbar waren,

b) ob diese den gleichen Abstand zu einander auf der ganzen Fläche beibehielten,

c) wie viele Linien pro mm Höhendifferenz auftraten.

Mit der planen Gipsoberfläche wurde der gesamte Tiefenbereich aufgesucht, in dem brauchbare Moiré-Linien entstehen.

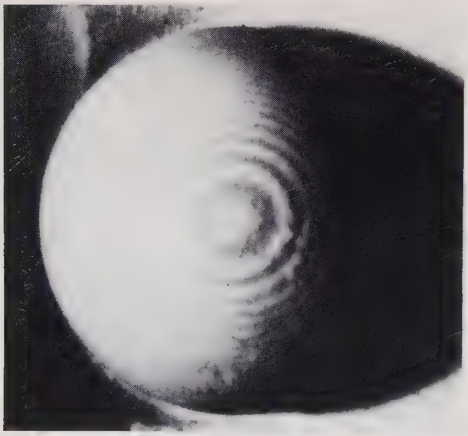


Abb. 24: Moiré-Fotografie einer Testkugel zur Eichung der Meßapparatur. Die Moiré-Linien sind konzentrische Kreise

3.6 Durchführung der Moiré-Fotografie

Bei den Moiré-Aufnahmen nach TAKASAKI werden die beiden Lichtquellen zu einer Aufnahme g l e i c h z e i t i g benutzt, um das Objekt schattenfrei auszuleuchten. Die Moiré-Linien werden durch die Anordnung nicht verändert, wenn eine exakt symmetrische Anordnung der Lichtquellen um den Beobachtungspunkt gegeben ist.
Diese präzise Anordnung wurde bei unserem Verfahren nicht durchgeführt, weil eine Verifikation der genauen Position der Lichtquellen zur optischen Achse nicht möglich war. Die Modelle wurden abwechselnd mit Beleuchtung von links und von rechts bei bewegtem Gitter fotografiert und beim Auswerten die entsprechenden Höhendifferenzen der Moiré-Linien berücksichtigt:

- Lichtquelle links, $\Delta h = 59\ \mu m$
- Lichtquelle rechts, $\Delta h = 61\ \mu m$

Die Beleuchtung von einer Seite erlaubt durch die nuancierten Grautöne der Abbildung eine rasche Orientierung über den Zustand des Oberflächenreliefs (Abb. 25, 26 und 27)

Abb. 25: Patient D. W., Zahn 27. Moiré-Bild einer do-Füllung unmittelbar nach Ausarbeitung und Politur; Beleuchtung von links

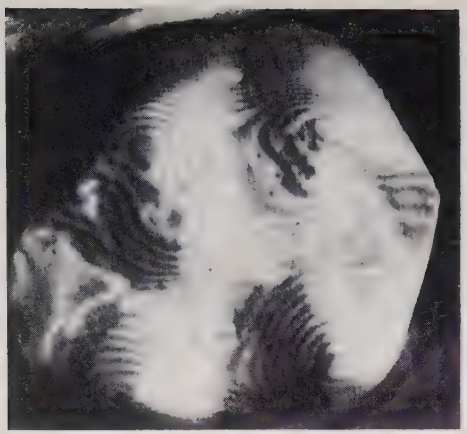


Abb. 26: Patient B. S., Zahn 36
Status nach Legen einer mod-Füllung
Beleuchtung von rechts

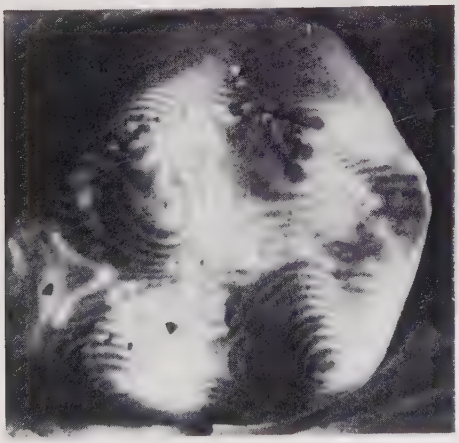


Abb. 27: Patient B. S., Zahn 36
Status der mod-Füllung nach einjähriger Tragezeit
Beleuchtung von rechts

3.7 Auswertung der Aufnahmen

3.7.1 Apparatur

Die so gewonnenen Aufnahmen wurden zur Auswertung mit einem Diaprojektor, Typ PRADOVIT®, Objektiv COLORPLAN CF® 2,5/90 mm (Anhang, S. 93), vergrößert auf eine Zeichenfläche projiziert, wo der Verlauf der Moiré-Linien im interessierenden Oberflächenbereich und damit dessen Höhenstruktur ausgemessen werden konnte.
Da in den anstehenden Meßreihen verschiedene Abdrücke eines Zahnes miteinander verglichen werden sollten, um die zwischenzeitliche Abrasion festzustellen, wurde eine Anordnung aus zwei Diaprojektoren des gleichen Typs aufgebaut, mit der gleichzeitig die zwei zu vergleichenden Aufnahmen aufeinander projiziert werden konnten. Durch wechselseitiges Ein- und Ausschalten ließ sich eine unterschiedliche Lage der Moiré-Linien in den Aufnahmen qualitativ sehr schnell feststellen.

3.7.2 Justierung der Apparatur

Zur Verminderung von Verzeichnungsfehlern sind die beiden Diaprojektoren auf einer stabilen Grundplatte gegeneinander und zur Zeichenfläche so einjustiert, daß sich ihre optischen Achsen in der Mitte des Gesichtsfeldes in der Zeichenfläche schneiden und die Winkelhalbierende der optischen Achsen senkrecht auf der Zeichenfläche steht (Abb. 28). Diese Justierung wurde mit Hilfe eines Justierlasers durchgeführt, dessen Strahl auf der Zeichenfläche an einem dazu aufgesetzten Spiegel in sich reflektiert wird. Die einjustierte Anordnung wurde unverrückbar in Kunststoff fixiert.

Da die Objektive der Projektoren nicht verzeichnungsfrei arbeiteten, war es für eine quantitative Auswertung wichtig, deren Verzeichnung festzustellen und eventuell die Meßergebnisse entsprechend zu korrigieren.

Zu diesem Zweck wurden geprüfte identische Testgitter auf die Zeichenfläche projiziert. Geschieht dies gleichzeitig mit beiden Projektoren, entstehen Moiré-Streifen, deren Verlauf einen ersten qualitativen Überblick über die Verzeichnung gibt.
Zusätzlich wurden die Testgitter einzeln projiziert und die Verzeichnung der Bilder ausgemessen (Fehlerdiskussion, S. 75).

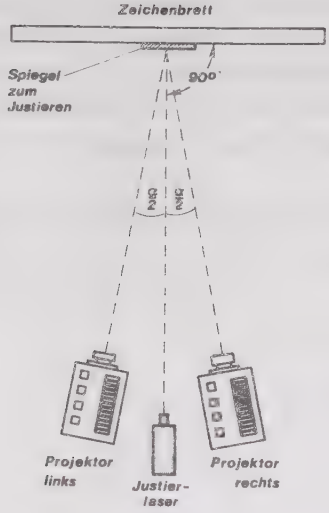


Abb. 28: Anordnung und Justierung der Apparatur zur Auswertung der Moiré-Bilder

3.7.3 Ermittlung der Maßzahlen (Koordinaten der Profilkurven)

3.7.3.1 Horizontale Deckung der zu vergleichenden Aufnahmen

Die beiden zu vergleichenden Aufnahmen wurden auf das Zeichenbrett projiziert, Umriß des Zahnes und unveränderte Okklusalbereiche zur Deckung gebracht. Zur Orientierung wurde zunächst an dem in die Zeichenebene projizierten Bild des Erstmodells Umriß, Strukturdetails und in unverändert angenommenen Oberflächenarealen das Moiré-Linienmuster mit einem feinen Bleistift nachgefahren. Das zweite Modell gelangte so zur Projektion, daß Umriß und Moiré-Linienmuster mit dem Aufgezeichneten für das Auge deckungsgleich waren. Der Diaprojektor konnte zu diesem Zweck horizontal vertikal und um die optische Achse durch Schrauben verstellt werden. Gelangten die beiden Bilder nicht genau zur Deckung, machte sich dies beim alternierenden Ein- und Ausblenden der beiden Projektoren durch "Bewegung" der Moiré-Linien bemerkbar. Bei Deckungsgleichheit "steht" das Moiré-Bild in den unverändert gebliebenen Flächen.

3.7.3.2 Auffinden von größten Verschleißbereichen

Die Lage der okklusalen Stops, die nach Füllungslegung notiert worden war, diente nun zum Auffinden von Bereichen mit maximalem Substanzverlust.

Die qualitative Eingrenzung erfolgte visuell durch die Beurteilung der Abstände der Moiré-Linien mit gleicher Ordnungszahl. Beurteilungskriterium für die quantitative Erfassung des Verschleißes einer Füllung war der in Bereichen der zentrischen Kontakte senkrecht zur Oberfläche gemessene Höhenverlust. Er wurde durch Überlagerung zweier Profilkurven der zu vergleichenden Oberflächenreliefs ermittelt.

3.7.4 Darstellung der Profilkurven und Errechnung der Maxima

Die vorhandene Meßeinrichtung ermöglicht eine Moirê-Topographie, bei der die Moirê-Streifen Höhenlinien darstellen. Sie überziehen eine Oberfläche in periodischen 116 µm-Schritten (Beleuchtung von links) bzw. 122 µm-Schritten (Beleuchtung von rechts). Da die hellen und dunklen Streifen des Gitters gleich breit sind, kann man sogar 59 µm-, bzw. 61 µm-Schritte unterteilen.
Die Punkte einer Profilkurve werden in ein Koordinatensystem folgendermaßen übertragen:
Die x-Werte liegen auf einer Geraden, die von der Höckerspitze durch den Kontaktpunktbereich (= Verschleißbereich) in die zentrale Grube geht (Abb. 32 und 33). Die x-Werte wurden nach Festlegung von Hilfspunkten ermittelt. Die Hilfspunkte entsprechen den Übergängen der hellen zu den dunklen Linien, bzw. umgekehrt, und wurden gewählt, da hier der Kontrast am stärksten und die Ablesegenauigkeit am größten ist. Zu den x-Werten gelangt man durch die jeweilige Mittelung der Abstände von Hilfspunkt zu Hilfspunkt.
Die dazugehörigen y-Werte sind durch die entsprechende Ordnungszahl der Moirê-Linien gegeben: Jeder Wert ist vom nächsten 59 µm, bzw. 61 µm entfernt.
Die Kurven wurden so durch n ($10 \leq n \leq 30$) Koordinatenpaare dargestellt und als Polygonzug gezeichnet (Plotterzeichnung nach Errechnung der Kurven durch den Computer). Die Zwischenpunkte der Kurven, bzw. die Tangentensteigung (t) wurden dabei durch kubische SPLINE-Interpolation unter Verwendung einer Programmroutine aus IMSL (= International Mathematical and Statistical Libraries, Inc.) bestimmt (Abb. 30 und 34).

Zur Bestimmung des Substanzverlustes bei einer Füllung wird der Profilkurve der Ursprungsfüllung (K_1) die Profilkurve der Testfüllung (K_2) überlagert (Abb. 31 und 35). Dabei haben beide Kurven den ersten Punkt gemeinsam (hier noch keine meßbare Höhendifferenz).

Der Verschleiß wird nun definiert als Abstand P_{K_1} zu P_{K_2} (≙ max.), wobei in jedem Punkt P_{K_1} von K_1 die Senkrechte auf der Tangenten (t) in P_{K_1} mit K_2 geschnitten wird (Abb. 29). Die Richtung des Verschleißes in einem Kontaktpunktbereich wurde so als senkrecht zur Oberfläche angenommen.

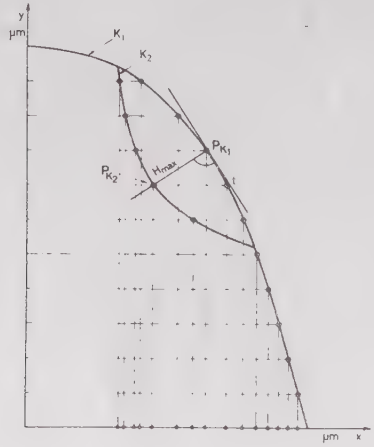


Abb. 29: Schematische Darstellung der Überlagerung zweier Profilkurven zur Ermittlung des Verschleißmaximums

Durch jeden Verschleißbereich werden drei Profilkurven gezogen; damit wird hier der größte Substanzverlust hinreichend genau eingegrenzt (Abb.32 u.33). Ein Okklusalrelief wurde dabei durch maximal 9 Profilkurven charakterisiert. Als Verschleißmaximum je Füllung wurde der größte Hmax-Wert ihrer Profilkurven angenommen.

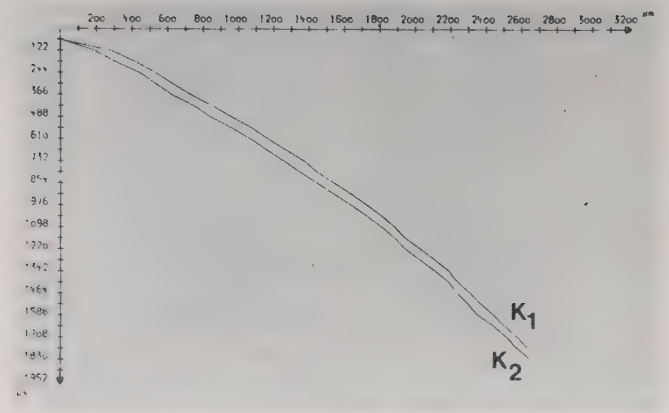


Abb. 30: Patient R. J., Zahn 36
Plotterzeichnung zweier Profilkurven nach vorausgegangener Koordinatenberechnung und Überlagerung

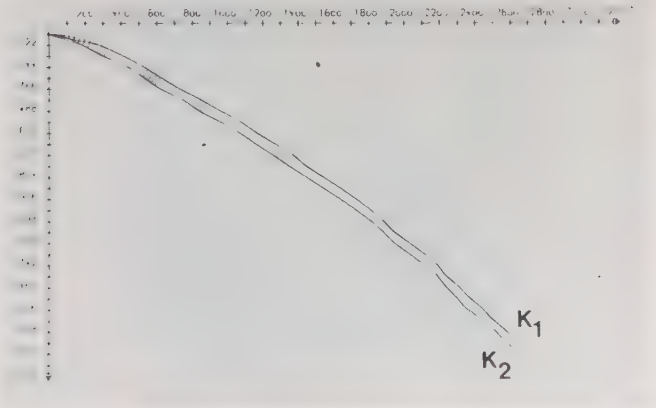


Abb. 31: Patient R. J., Zahn 36
Plotterzeichnung der überlagerten Profilkurven mit Darstellung der möglichen Maxima

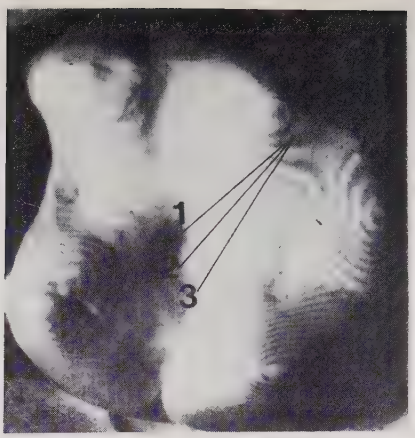


Abb. 32: Patient W. A., mod-Füllung bei Zahn 46
Moiré-Fotografie des Erstmodells mit eingezeichneten Geraden zur Ermittlung dreier Profilkurven in einem Verschleißbereich

Abb. 33: Patient W. A., mod-Füllung bei Zahn 46
Moiré-Fotografie derselben Füllungsoberfläche wie in Abb. 32 nach einjähriger Tragezeit.
Die eingezeichneten Geraden sind dieselben und charakterisieren jene Profilkurven, die den Ursprungskurven überlagert werden.

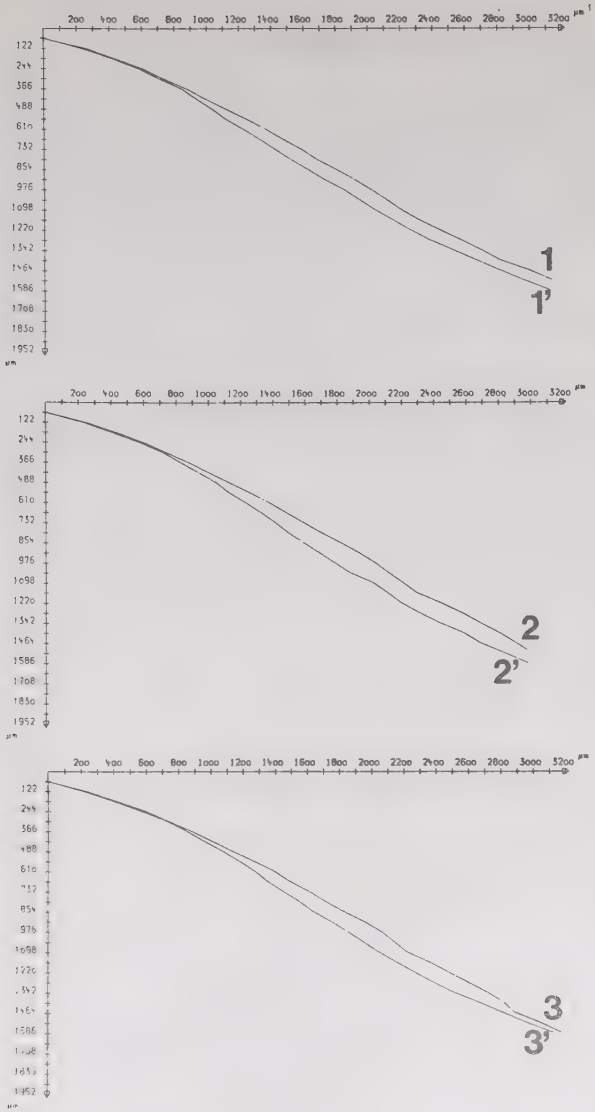


Abb. 34: Überlagerung der drei Profilkurvenpaare, deren Verlauf durch die Geraden in Abb. 32 und Abb. 33 festgelegt wurden.
Plotterzeichnung nach vorausgegangener SPLINE-Interpolation

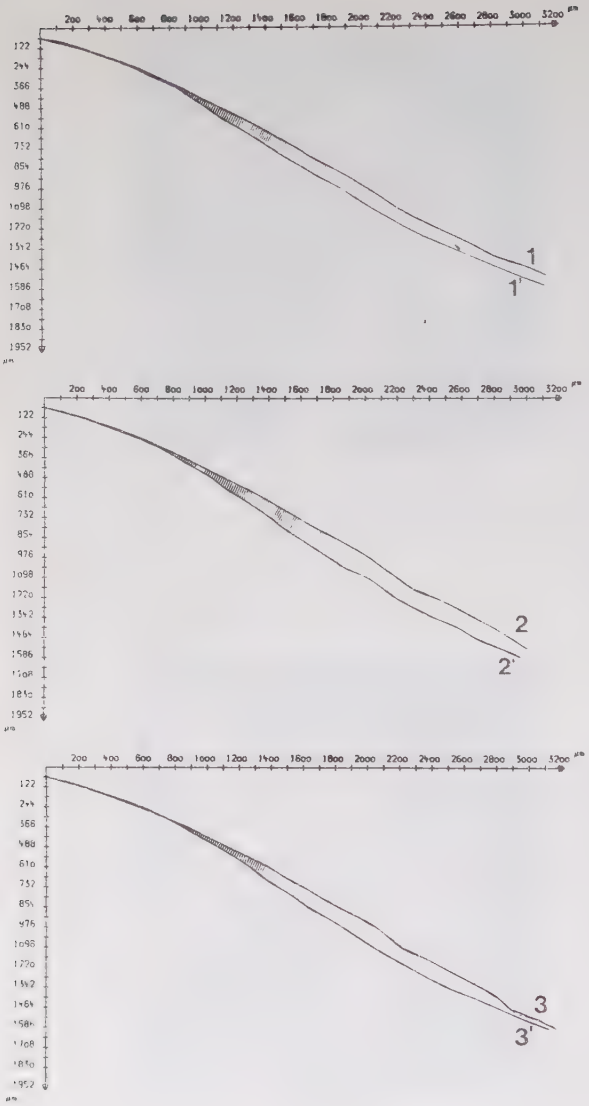


Abb. 35: Plotterzeichnung der Profilkurvenpaare aus Abb. 34 mit Darstellung der möglichen Maxima

4. Ergebnisse

Nach einjähriger Tragezeit wurde bei 5 Füllungen die Verschleißfestigkeit mittels der Moiré-Topografie bestimmt. Der hohe Arbeitsaufwand und die oben erwähnten Anforderungen ließen eine Anzahl von 5 zu untersuchenden Füllungen als sinnvoll erscheinen.

Die Meßergebnisse sind in der Tabelle 5 zusammengefaßt und in der Abb. 36 graphisch dargestellt.

Tab. 5: Maximale Verschleißwerte für ESTIC MICROFILL®

Modell Nr.	1	2	3	4	5	Ø
Zahnart	Molar	Molar	Molar	Prämolar	Molar	-
Füllg.art	mod	mod	mo	mo	do	-
Anzahl Profilkurven	3	7	3	6	6	-
Max.Werte in µm nach 1 Jahr	$147\pm\frac{3}{3}$	$126\pm\frac{6}{7}$	$99\pm\frac{3}{4}$	$122\pm\frac{5}{6}$	$99\pm\frac{10}{10}$	$118{,}5\pm\frac{5}{6}$

Gleichzeitig untersuchten HAHN (1983) und REIN (1983) im Rahmen ihrer Dissertationen die Kunststoffe UVIO FILL® und ISO V (Isomolar) (Anhang, S. 94 u. 96) mit dem hier beschriebenen Verfahren. Ihre Ergebnisse sind den obigen gegenübergestellt und sollen eine vergleichende Diskussion ermöglichen (Tab. 6 und Abb. 37).

Tab. 6: Maximale Verschleißwerte nach einem Jahr bei Kunststoffüllungen aus UVIO FILL® und ISO V (Isomolar), Werte in µm

UVIO FILL®	$125\pm\frac{4}{5}$	$165\pm\frac{6}{5}$	$53\pm\frac{6}{6}$	$90\pm\frac{5}{5}$	$133\pm\frac{6}{6}$	$113\pm\frac{5}{5}$
ISO V (Isomolar)	$111\pm\frac{7}{7}$	$35\pm\frac{3}{3}$	$67\pm\frac{4}{4}$	$50\pm\frac{6}{4}$	$82\pm\frac{6}{5}$	$69\pm\frac{5}{5}$

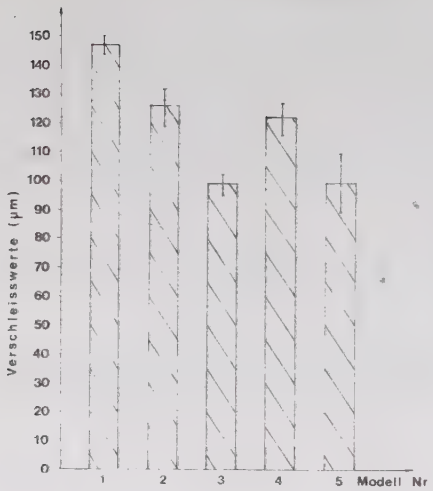


Abb. 36: Verschleißwerte von ESTIC MICROFILL®
nach einem Jahr

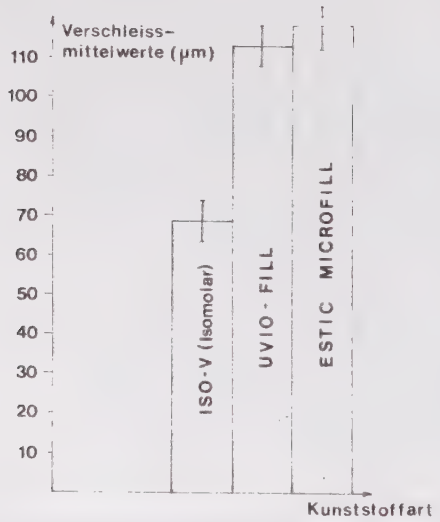


Abb. 37: Verschleißmittelwerte nach einem Jahr Tragezeit von ISO V (Isomolar), UVIO FILL® und ESTIC MICROFILL®

5. Diskussion

5.1 Diskussion der Ergebnisse

Die errechneten Maximalwerte für den Verschleiß an okklusionstragenden Füllungen aus den untersuchten Kunststoffen (ESTIC MICROFILL®, UVIO FILL®, ISO V (Isomolar)) sind vor allem als Einzelergebnisse zu werten, da zum einen der Stichprobenumfang sehr gering und zum anderen der Zeitraum der Beobachtung relativ kurz war.
Aber selbst ein großer Stichprobenumfang würde nur vorsichtige Aussagen ermöglichen. Viele Faktoren können das Einzelergebnis beeinflußt haben; die Problematik wird bei deren Auflistung deutlich: (WEBER 1980 a und b)

1. Die individuelle Verschiedenheit der einzelnen Menschen
2. Die Unmöglichkeit der Herstellung gleichstarker Kontaktpunkte an jedem Zahn
3. Die Meßtechnik

Die Individualität der Versuchspersonen kann sich sehr vielfältig zeigen und auswirken:
- Individueller Kaudruck
- Wechselnde Kraftrichtung durch Bewegung des Unterkiefers und durch Anatomie der Kauflächen
- Wechselnde Geschwindigkeit der Krafteinwirkung
- Wechselnde Gegenstoffe durch unterschiedliche Ernährung
- Wechselnde Häufigkeit der Belastung (beeinflußt durch psychische Faktoren)
- Temperaturveränderungen
- Chemische Einflüsse
- Biologie der Mundhöhle

Den Ausführungen von LUTZ (1980 c) zufolge muß man bei Kompositrestorationen unmittelbar nach dem Ausarbeiten stets mit stärkeren Okklusionskontakten rechnen, als dieses bei Amalgam der Fall wäre. In den ersten 30 Tagen nach Legen der Füllung können demzufolge unterschiedlich große, zum

Teil extreme Substanzverluste auftreten. Bei der vorliegenden Untersuchung wurden die Erstmodelle gleich nach der Politur erstellt und die anfänglich unterschiedlich stark wirksame Attrition auf das Okklusalrelief außer acht gelassen, um unter praxisgerechten Bedingungen eine Aussage machen zu können.

Bei der Meßtechnik ist man folgenden Schwierigkeiten ausgesetzt:
- Lokalisation des Meßortes
- Markierung des Meßortes (Wiederauffinden von Referenzpunkten)
- Meßfehler bei der Übertragung

Die ermittelten Verschleißdaten der drei Kunststoffmaterialien (ESTIC MICROFILL®, UVIO FILL®, ISO V (Isomolar)) wurden auf die Signifikanz ihrer Güteunterschiede untersucht. Dabei wurde auf den U-Test nach WILCOXON, MANNY und WHITNEY zurückgegriffen, weil ein klassischer t-Test oder eine Varianzanalyse auf Grund der Inhomogenität der Varianzen nicht in Frage kam.
Mit 95 % Sicherheit läßt sich ein signifikanter Unterschied zwischen ESTIC MICROFILL® und ISO V (Isomolar), sowie zwischen ISO V (Isomolar) und UVIO FILL® feststellen. Die Unterschiede zwischen ESTIC MICROFILL® und UVIO FILL® sind nicht signifikant.

5.2 Fehlerdiskussion

Folgende Fehlermöglichkeiten stehen bei dem angewandten Verfahren zur Diskussion:

a) Unterschied Original-Gipsmodell

Nach METTLER et al. (1978) und LUTZ (1980 c) sind die Gipsreplikas nach der beschriebenen Herstellungsmethode hinreichend genau in unserem Meßbereich.

b) Reponiertechnik

Das identische Einbringen der zeitlich gestaffelt gewonnenen Gipsmodelle einer Füllung in die Meßapparatur wurde durch zehnmaliges Reponieren ein- und desselben Testmodells durch dieselbe Person auf mögliche Abweichungen untersucht (vgl. 3.4).
Eine mögliche Abweichung lag außerhalb der Meßgenauigkeit.

c) Gemeinsame Bezugsebene

Allen Messungen lag die Annahme zugrunde, daß auf der Zahnoberfläche unverändert gebliebene Schmelzareale vorhanden waren. Die Punkte der gewählten Referenzebene (vgl. 3.4) lagen innerhalb dieser Areale. Bei der Überlagerung der Bilder mittels Diaprojektion auf dem Zeichenbrett kamen in diesen Bereichen die Moiré-Linien zur Deckung. Zähne, die diese Voraussetzung nicht erfüllten, kamen nicht zur Auswertung.

d) Abweichungen durch die verwendete Optik
- Verzeichnung durch die Objektive

Ein definiertes Liniengitter wurde fotografiert und anschließend mit den Diaprojektoren auf das Zeichenbrett projiziert. Für jeden Projektor wurden 400 Rasterpunkte ausgemessen und die Verzeichnung, die bei der Überlagerung der Bilder b e i d e r Projektoren auftrat, ermittelt. In dem gewählten Arbeitsbereich lag die Verzerrung bei + 3 % linear (vgl. 3.5).

- Abweichung der Moiré-Linien von idealen Höhenlinien

Aufgrund der gewählten Anordnung Lichtquelle-Kamera, vor allem aber durch das Fehlen einer punktförmigen Lichtquelle mußte eine Abweichung der Moiré-Linien von Isohypsen mit zunehmender Entfernung vom Gitter in Kauf genommen werden. Sie ist die Folge der perspektivischen Verzerrung des Gitterschattens mit zunehmender Entfernung von der Kamera. Die Abstände der Moiré-Linien werden mit zuneh-

mender Tiefe geringer und sind nicht mehr äquidistant. Mit einem Testobjekt (Schiefe Ebene, vgl. 3.5) wurde die Abweichung für den maximalen Tiefenbereich unserer Messung ermittelt. Sie betrug - 3 % linear.

Die Verzerrungen durch die Objektive (+ 3 %), sowie diejenige durch die Perspektive (- 3 %) sind entgegengesetzt und heben sich auf dem Zeichenbrett in den untersuchten Meßarealen auf.

e) Bestimmung des Vergrößerungsmaßstabes

Fotografierte Testkugeln (vgl. 3.5) verschiedener Radien brachten einen mittleren Vergrößerungsmaßstab von 41,6 ± 0,3. Diese Ungenauigkeit ist die Folge der perspektivischen Verzeichnung der Objekte bei der Fotografie: Kameranahe Bereiche wirken größer, kameraferne kleiner als es der Realität entspricht. Bei der Fehlerrechnung wurden alle möglichen Vergrößerungsmaßstäbe durch ein Computerprogramm simuliert und ihr Einfluß auf die Verschleißmaxima berücksichtigt.

f) Ableseungenauigkeit

Beim Auswerten der Moiré-Bilder verursachte die Festlegung der Meßpunkte Schwierigkeiten, weil keine scharfen Übergänge zwischen hellen und dunklen Moiré-Streifen bestehen. Der unter 3.7.4 beschriebene Ablesemodus wurde stets von der gleichen Person durchgeführt. Beim mehrmaligen Festlegen und Ausmessen derselben Profilkurve auf dem Zeichenbrett streuten die einzelnen abgelesenen Werte um ± 0,25 mm. Das ergibt ± 6 µm auf der Originaloberfläche. Dieser Fehler wurde ebenfalls bei der Fehlersimulation berücksichtigt.

g) Eichfehler

Die Eichung der Äquidistanz der Moiré-Linien brachte Werte zwischen 116 und 120 µm bei der Beleuchtung von links und 120 - 124 µm bei Beleuchtung von rechts. Diese Abweichungen gingen ebenfalls in die Fehlerrechnung ein.

Den Einfluß aller relevanten Fehler auf die Ergebnisse untersuchte ein Rechenprogramm, in dem für jedes zu errechnende Maximum alle auftretenden Fehlerkombinationen simuliert wurden. Die Abweichungen sind jeweils für jeden Wert individuell und werden im Ergebnis aufgeführt.

Die in den Tabellen angegebenen Maximalwerte für den Verschleiß ergaben sich aus der Auswertung von mindestens je 3 bis maximal je 7 Profilkurven eines Okklusalreliefs. Zur Vollständigkeit der Fehlerdiskussion sei bemerkt, daß die gewählte Unsicherheit von ± 10 Mikrometer als eine vernünftige obere Fehlerschranke angenommen werden kann. Bei allen 70 erstellten Profilkurven (für ESTIC MICROFILL®, UVIO FILL® und ISO V (Isomolar)) liegt die Abweichung unterhalb dieser Grenze.

5.3 Diskussion des Meßverfahrens

Die entwickelte Meßmethode ordnet sich in die Gruppe der indirekten Verfahren zur Bestimmung des okklusalen Substanzverlustes ein. Sie greift auf unbehandelte Gipsmodelle der zu untersuchenden Zähne samt Füllungen zurück. Eine fehlerfreie Herstellung solcher Replikas ist Voraussetzung des Funktionierens der Messung.
Die Moiré-Topographie erlaubt eine rasche qualitative Übersicht der zu untersuchenden Okklusaloberfläche von Zahn und Füllung. Die Gebiete mit größter Oberflächenveränderung können mühelos dem Moiré-Bild entnommen werden und das Festlegen des Meßortes erfordert keinen großen Aufwand.
Durch abwechselnde Beleuchtung von links und rechts ist jedes Areal der Oberfläche erfaßt und auswertbar.
Der Auswertung entziehen sich nur sehr steile Abhänge und Stufen senkrecht zur Gitterebene. Solche Oberflächenformen kamen an den untersuchten Füllungen nicht vor.
Die größte Schwierigkeit besteht darin, die zu vergleichenden Moiré-Bilder in Deckung zu bringen. Ein noch so geringer Fehler bei der vorangegangenen Reposition in die optische Bank macht eine Bilddeckung unmöglich.

Genau so negativ wirkt sich eine Zahnwanderung oder gar eine Zahnrotation aus. Das Festlegen einer Referenzebene wird unmöglich. Die Annahme unveränderter Areale auf der Zahnoberfläche wurde schon unter 5.2 gefordert.

Reposition und Ermittlung der Profilkurven in den Abrasionszentren der Füllungen erfordern einen großen Arbeitsaufwand. Um die Fehlermöglichkeit gering zu halten, wurden die einzelnen Arbeitsabschnitte immer von ein- und derselben Person vorgenommen. Besonders die Befestigung der Modelle im Übertragungsrahmen und die Festlegung der Koordinaten der Profilkurven an den Übergängen der hellen und dunklen Moiré-Streifen stellen diese Anforderung.

Mit einer Unsicherheit der Höhenangabe von ± 10 µm ist das Verfahren für die vorgenommenen Messungen hinreichend genau. Ein Vergleich mit den Verfahren von METTLER et al. (1978) und MEIER und LUTZ (1980) bietet sich an, da auch hier Abstände von Meßpunkten zu einer Referenzebene als Maß für Abrasion gelten.
METTLER et al. (1978) legten ein Meßraster auf die Zahnoberfläche der Gipsreplikas, das sich an lingualen Höckerspitzen als Referenzpunkten orientierte. Mindestens 20 Meßpunkte von der Bezugsebene in vertikaler Richtung erfaßten im Durchschnitt das Oberflächenrelief einer Füllung. Diese vertikalen Werte zwischen Anfangsmodell und Vergleichsmodell wurden subtrahiert und ihre Differenzen ergaben ein Maß für die Abrasion in den jeweiligen Punkten. Die mittlere Abrasion pro Füllung wurde als statistischer Zentralwert (Mediane) aller gemessenen Punkte definiert.
Nach einem Jahr konnten folgende Verschleißwerte festgestellt werden: AMALGAM 18 ± 58 µm, EPOXYDENT® 38 ± 50 µm, ADAPTIC® 92 ± 97 µm, CONCISE CAP® 146 ± 75 µm.

MEIER und LUTZ (1980) brauchten zu ihrem Tastschnittverfahren nur zwei Meßpunkte je Füllung. Ihre Messungen beschränkten sich jedoch auf e i n e n nahezu punktförmigen

Bereich zur Bestimmung der Abrasion. Diese Tastschnitte gingen durch den tiefsten Punkt der mittleren bzw. der mesialen oder der distalen Grube und setzten eine Füllungslegung und Ausarbeitung voraus, bei der die okklusalen Kontakte genau in diesen Bereich gelegt werden konnten. Das Maß der Abrasion stellte der vertikale Substanzverlust im Bereich des zentrischen Kontaktes dar, der sich durch Überlagern der Profilkurven vor und nach der Meßperiode ergab. Die Bezugsebene für die vertikalen Abstände war durch die Höckerspitzen definiert.
Nach einem Jahr konnten folgende Werte ermittelt werden: AMALGAM 32 ± 17 µm, ADAPTIC® 135 ± 49 µm, ESTIC MICROFILL® 28,4 ± 7,2 µm, ESPE-V® 55,9 ± 28,3 µm und ISO V® 65,3 ± 24,4 µm.

Mit der Moiré-Topographie ergaben sich höherliegende Werte: ESTIC MICROFILL® 118,5 ± $\frac{5}{6}$ µm, UVIO FILL® 113 ± 5 µm und ISO V (Isomolar) 69 ± 5 µm.
Die Unterschiede der Zahlenwerte bei den drei Meßverfahren erklären sich durch die jeweils gewählte Art des Maßes zur Bestimmung der Verschleißfestigkeit.
Bei allen Meßmethoden zeigen konventionelle Komposits eine deutlich geringere Verschleißfestigkeit als mikrofüllerhaltige Komposits.

C) ZUSAMMENFASSUNG

Die vorliegende Arbeit ist eine klinische und experimentelle Studie über die Anwendungsmöglichkeit des Mikrofüller-Komposits ESTIC MICROFILL® als Restorationsmaterial für Klasse I und II-Füllungen.

Nachdem sich konventionelle Komposits als Amalgamersatz nicht bewährt haben, weil das Materialgefüge einer längerfristigen Belastung nicht standhält, versucht die Generation der mit Mikrofüllern kolloidal gefüllten Kunststoffe den Einsatz im Seitenzahngebiet.
ESTIC MICROFILL®, das zu dieser Gruppe von Kunststoffen gehört, gelangte bei 25 Seitenzahnfüllungen (ein-, zwei- und dreiflächig) zur Anwendung. Die Patienten stammten aus dem Probandengut der Abteilung für Zahnerhaltung des Zentrums für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde der Universität Tübingen.
Das klinische Vorgehen orientierte sich an den Prinzipien der adhäsiven Restoration, mußte aber bei der Kavitätenpräparation die spezifische Ausdehnung der Kariesläsionen im Seitenzahngebiet berücksichtigen. Die Kavitätenform wurde dahingehend modifiziert, daß sie im approximalen Bereich einer konventionellen Präparation und im okklusalen Bereich einer adhäsiven Präparation entsprach.
Nach einer Tragezeit von einem Jahr konnten alle 25 Restorationen klinisch nachuntersucht werden. Die Beurteilung erfaßte veränderte, bzw. unveränderte Konstruktionsmerkmale, Substanzverluste im okklusalen Kontaktpunktbereich, marginale Adaptation, sowie Verfärbungen oder farbige Einlagerungen. Danach konnte der Gesamteindruck als gut bezeichnet werden.

Um objektive Messungen bezüglich der Verschleißfestigkeit von okklusionstragenden Seitenzahnfüllungen zu erhalten, wurde ein Meßverfahren nach dem Moiré-Prinzip entwickelt, das es gestattete, Substanzverluste im okklusalen Bereich

senkrecht zur Oberfläche zu quantifizieren.
Die Moiré-Topographie (TAKASAKI 1970) gestattet das Überziehen von Objekten mit hellen und dunklen Streifen, die bei justierter Apparatur Höhenlinien darstellen. Der Verschleiß einer Kunststoffüllung ließ sich indirekt durch den Vergleich zweier Gipsreplikas ermitteln, die sofort nach Füllungslegung und nach einem Jahr Tragezeit hergestellt wurden.
Mittels der Moiré-Bilder solcher Replikas wurden Profilkurven der Oberfläche erstellt und einander überlagert. Als Maß für den Verschleiß steht der größte senkrechte Abstand zwischen zwei Profilkurven.
Insgesamt konnte bei 5 Restorationen der Verschleiß im okklusalen Kontaktpunktbereich ermittelt werden. Es ergaben sich dabei Werte zwischen 99 µm und 147 µm mit einer Unsicherheit von ± 10 µm.

D) LITERATURVERZEICHNIS

1. AMEYE, C.: Vergleichende in vivo- und in vitro-Untersuchungen von verschieden aufgebauten Kompositkonstruktionen. Med. Diss. Tübingen 1982

2. BRÄNNSTRÖM, M.: Dentin and pulp in restorativ dentristy. Dental Therapeutics AB, Ektorpsvägen 3, SCHWEDEN 1981

3. BRÄNNSTRÖM, M. und JOHNSSON, G.: Effects of various conditioners and cleaning agents on prepared dentin surfaces: A scanning election microscopic investigation. J.prosth.Dent. 31, (1974) 422-430

4. BROOKS, R.E. und HEFLINGER, L.O.: Moiré gauging using optical interference patterns. Appl. Opt. 8 (1969) 935 - 939

5. DENNISON, J.B., POWERS, J.M. und CHARBENEAU, G.T.: Measurement of in vivo wear on posterior composite restorations. J.dent.Res. 59, (1980) Abstract 202

6. EBERT, M.: Die Erfassung der menschlichen Trochlea tali mit Hilfe des Isohypsenverfahrens. Med.Diss. Tübingen 1967

7. EICHNER, K.: Zahnärztliche Werkstoffe und ihre Verarbeitung. 4. Aufl. Hüthig, Heidelberg 1981

8. FINGER, W. und DREYER JØRGENSEN, K.:
Polymerisationsinhibition durch Sauerstoff bei Kompositfüllungsmaterialien und Schmelzversieglern.
Schweiz.Mschr.Zahnheilk. 86, (1976) 812-824

9. FINGER, W. und DREYER JØRGENSEN, K.:
Porosität von Kompositfüllungsmaterialien.
Schweiz.Mschr.Zahnheilk. 87, (1977) 482-489

10. v. GROENINGER, G. und ARENDS, J.:
In-Vivo-Abrasion von Composite-Füllungen: Eine quantitative Untersuchung.
Quintess.zahnärztl.Lit. 33, (1982) Ref.Nr. 6351, 883-849

11. GWINNETT, A.J.: Structural changes in enamel and dentin of factured anterior teeth after acid conditioning in vitro.
J.Amer.dent.Ass. 86, (1973), 117-122

12. HAHN, S.: Klinische Erfahrungen mit dem Mikrofüller-Komposit Uvio Fill®, Entwicklung eines Meßverfahrens nach dem Moiré-Prinzip zur Quantifizierung der Verschleißfestigkeit okklusionstragender Restorationen.
Med.Diss., Tübingen 1983

13. HANDELMANN, S.L. und PAMEIJER, C.H.:
Quantitative assessment of sealant wear in vivo.
J.Prosth.Dent. 50, (1983) 511-514

14. HIETANEN, J. und RANTANEN, A.V.:
Evaluation of different composite finishing methods.
Proc.Finn.dent.Soc. 72, (1976) 11

15. HOLLER, W., WINDISCHBAUER, G., CABAJ, A. und KECK, G.:
Moiré-Topographie zur Darstellung von Zahnoberflächen.
Biomedizinische Technik 23, (Ergänzungsband), (1978) 213-214

16. JØRGENSEN, K.D. und ASMUSSEN, E.:
Occlusal abrasion of a composite restorative resin with ultrafine filler-an initial study.
Quintess. Int. 9, (1978) Report 1646, 73

17. JØRGENSEN, K.D., HØRSTED, P., JANUM, O., KROGH, J. und SCHULTZ, A.J.:
Abrasion of Class I restorative resins.
Scand.J.dent.Res. 87, (1979) 140-145

18. KECK, G., BINDER, W., CABAJ, A., KLÄRING, J. und WINDISCHBAUER, G.:
Moiré-topographische Verfahren in der Medizin: Anwendung in der Strahlentherapie.
Optik 46, (1976) 431-437

19. LACMANN, O.: Die Photogrammetrie in ihrer Anwendung auf nicht-topographischen Gebieten.
S. Hirzel, Leipzig 1950

20. LENK, H.: Holographie.
VEB Georg Thieme, Leipzig 1969

21. LUTZ, F.: Der Einfluß einer Fluoridapplikation nach der Schmelzätzung auf Adaption und Haftung von Adhäsivfüllungen. Schweiz.Mschr.Zahnheilk. 87, (1977) 712-723

22. LUTZ, F.: Kompositfüllungen - Rationelleres Ausarbeiten und bessere Randqualität dank neuentwickelten Schleifkörpern (I). Quintess. zahnärztl.Lit. 31, (1980 a) Ref.Nr. 6124, 273-284

23. LUTZ, F.: Kompositfüllungen - Rationelleres Ausarbeiten und bessere Randqualität dank neuentwickelten Schleifkörpern (II). Quintess. zahnärztl.Lit. 31, (1980 b) Ref.Nr. 6124, 125-129

24. LUTZ, F.: Beiträge zur Entwicklung von Seitenzahnkomposits. Eigenverlag Abt. Kariologie, Parodontologie und Präventivmedizin, Zahnärztl.Institut der Universität Zürich, 1980 c

25. LUTZ, F., LÜSCHER, B., OCHSENBEIN, H. und MÜHLEMANN, H.R.: Die Entwicklung der perfekt adaptierten randspaltfreien MOD-Kompositfüllung, in vitro Befunde. Schweiz.Mschr.Zahnheilk. 86, (1976 a) 1025-1041

26. LUTZ, F., LÜSCHER, B., OCHSENBEIN, H. und MÜHLEMANN, H.R.: Adhäsive Zahnheilkunde. Juris Druck & Verlag, Zürich 1976 b

27. LUTZ, F., LÜSCHER, B. und OCHSENBEIN, H.:
Adaptation und Randschluß von thixotropen Komposits und Spritzkapselsystemen, In-vitro-Befunde.
Schweiz.Mschr.Zahnheilk. 87, (1977) 684-693

28. MANNERBERG, F.: Isosit, ein neuer Füllungswerkstoff.
Quintess.zahnärztl.Lit. 28, (1977) Ref.Nr. 5592, 33-42

29. MANNERBERG, F.: Fünf Jahre klinische Erfahrungen mit Isosit (I), ein Microfüller enthaltendes Kunststoff-Füllungsmaterial.
Quintess.zahnärztl.Lit. 31, (1980) Ref.Nr. 6098, 39-50

30. McCABE, J.F. und CADDICH, R.J.K.:
The finishing of composite restorations.
Brit.dent.J. 145, (1978) 101-104

31. MEIER, Ch.: Eine Methode zur Bestimmung der Verschleißfestigkeit von Füllungsmaterialien in vivo.
Med.Diss.Zürich 1977

32. MEIER, Ch. und LUTZ, F.:
Verschleißmessungen in vivo an okklusalen Komposit- und Amalgamfüllungen.
Dtsch.zahnärztl.Z. 33, (1978) 617-622

33. MEIER, Ch. und LUTZ, F.:
Komposits kontra Amalgam: Vergleichende Verschleißfestigkeitsmessung in vivo: 1-Jahres-Resultate.
Schweiz.Mschr.Zahnheilk. 89, (1979) 203-212

34. MEIER, Ch. und LUTZ, F.:
Vergleichende Verschleißfestigkeitsmessungen in vivo zwischen Amalgam und Komposit.
Dtsch.zahnärztl.Z. 35, (1980) 489-492

35. MEINERS, H.:
Abformgenauigkeit mit elastomeren Abformmaterialien.
Hanser, München/Wien 1977

36. METTLER, P., FRIEDRICH, U. und ROULET, J.F.:
Studie über die Abrasion von Amalgam und Komposits im Seitenzahnbereich.
Schweiz.Mschr.Zahnheilk. 88, (1978) 324-344

37. MEURMANN, J.H. und HELMINEN, S.J.:
Repair of fractured incisal edges with ultraviolet-light activated fissure sealment and composite resin.
Proc.Finn.dent.Soc. 70, (1974) 186-190

38. MÖRMANN, W., LIETHA-ELMER, E., MEIER, Ch. und LUTZ, F.:
Oberflächenanalyse von zwei Kompositfüllungsmaterialien nach unterschiedlicher Feinausarbeitung und Endversieglung.
Schweiz.Mschr.Zahnheilk. 87, (1977) 667-683

39. NEWESELY, H. und VENZ, S.:
Bearbeitungsmethoden für Composite-Füllungsmaterialien im Modellversuch unter besonderer Berücksichtigung von Zusammensetzung und Gefüge.
Dtsch.zahnärztl.Z. 32, (1977) 698-699

40. NOLDEN, R.: Vergleichende Untersuchungen mechanischer Eigenschaften der derzeitigen selbsthärtenden und lichthärtenden Füllungskunststoffe.
Dtsch.zahnärztl.Z. 35 (1980) 506-510

41. POTTS, R.M., RACZ, W.B. und FARRINGTON, A.P.:
The quantitative measurement of wear of occlusal restorations in the clinical situation.
J.dent.Res. 55, (1976) Abstract 128

42. POTTS, R.M., RACZ, W.B. und FARRINGTON, A.P.:
The quantitative measurement of wear of occlusal restorations in the clinical situation.
Technical Bulletin, Johnson & Johnson, 1978

43. RAU, G.: Klinische Erfahrungen mit der adhäsiven Restoration nach dem NUVA®-System.
Zahnärztl.Welt 86, (1977) 296-304

44. REIN, H.: Klinische Erfahrungen mit dem Mikrofüller-Komposit ISO V (Isomolar), Entwicklung eines Meßverfahrens nach dem Moiré-Prinzip zur Quantifizierung der Verschleißfestigkeit okklusionstragender Restorationen.
Med.Diss., Tübingen 1983

45. REINHARDT, K.J. und VAHL, J.:
Untersuchungen füllstoffhaltiger und -freier Adhäsive im Vergleich zu einem Composite.
Dtsch.zahnärztl.Z. 32, (1977) 867-870

46. REINHARDT, K.J. und VAHL, J.:
Untersuchungen physikalischer Eigenschaften hochglanzpolierbarer Füllungsmaterialien im Vergleich zu Compositen.
Dtsch.zahnärztl.Z. 33, (1978) 547-553

47. RIETHE, P.: Entwicklung der Frontzahnfüllungswerkstoffe.
Zahnärztl.Mitt. 68, (1978) 316-321

48. RIETHE, P., ROTGANS, J. und SCHMALZ, G.:
Tierexperimentelle Prüfungen mit einem neuen Füllungsmaterial (Isocap).
Dtsch.zahnärztl.Z. 33, (1978) 609-615

49. ROULET, J.F.: Die Abrasion von Komposits.
Schweiz.Mschr.Zahnheilk. 86, (1976 a) 413-426

50. ROULET, J.F.: Untersuchung über den Randschluß von Komposits in vivo.
Schweiz.Mschr.Zahnheilk. 86, (1976 b) 699-712

51. ROULET, J.F.: Die Prüfung des Randschlusses sogenannt schnitzbarer Komposits.
Schweiz.Mschr.Zahnheilk. 88, (1978) 345-364

52. ROULET, J.F., METTLER, P. und FRIEDRICH, U.:
Studie über die Abrasion von Komposits im Seitenzahnbereich-Resultate nach 3 Jahren.
Dtsch.zahnärztl.Z. 35, (1980) 493-497

53. RÜMANN, F. und LUTZ, F.:
Komposits als Amalgamersatz - klinische und experimentelle Resultate.
Quintess.zahnärztl.Lit. 31, (1980)
Ref.Nr. 6061, 133-143

54. SAUERWEIN, E.: Zahnerhaltungskunde 4. Aufl.,
Georg Thieme Verlag, Stuttgart 1981

55. SCHAEFER, R.: Der neue Dentalwerkstoff Mikrofill.
Kulzer ZÜe 3, (1979)2

56. SCHWICKERADT, H.: Werkstoffe in der Zahnheilkunde.
Quintessenz Verlag 1977

57. SCHWIDEFSKY, K.: Grundriß der Photogrammetrie 4. Aufl.
Verlag für Wissenschaft und Fachbuch,
Bielefeld 1950

58. SILVERSTONE, L.M.:
Fissure sealants: laboratory studies.
Caries Res. 8 (1974) 2-26

59. STEINHILBER, W.: Beeinflußt das Kiefergelenk die Abrasionsform der Zähne?
Med.Diss. Tübingen 1970

60. TAKASAKI, H.: Moiré topography.
Appl. Opt. 9 (1970) 1467-1472

61. TETZLAFF, W.: Eine Methode zur Darstellung von Oberflächenformen mit Hilfe des Moiré-Verfahrens am Beispiel zahnärztlicher Kiefermodelle.
Med.Diss. Tübingen 1978

62. TRIADAN, H.: Entwicklung der Füllungskunststoffe bis zu den heutigen Komposits. Zahnärztl. Prax. 30, (1979) 542-548

63. TSURUTA, T. und ITOH, Y.: Interferometric generation of counter lines on opaque objects. Opt. comm. 1, (1969) 34-36

64. VIERLING, O.: Die Stereoskopie in der Photographie und Kinematographie. Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft, Stuttgart 1965

65. WEBER, H.: Klinische und experimentelle Untersuchungen zur Frage der Abrasionsfestigkeit von Isosit unter besonderer Berücksichtigung der Problematik der Abrasionstestung (I). Quintess.zahnärztl.Lit. 31, (1980 a) Ref.Nr. 6035, 117-124

66. WEBER, H.: Klinische und experimentelle Untersuchungen zur Frage der Abrasionsfestigkeit von Isosit unter besonderer Berücksichtigung der Abrasionstestung (II). Quintess.zahnärztl.Lit. 31, (1980 b) Ref.Nr. 6035, 123-129

67. WINDISCHBAUER, B., KECK, G. und CABAJ, A.: Moiré-topographische Verfahren in der Medizin: Ein Podometer zur Dokumentierung von krankhaften Fußstellungen. Orthop.Technik 1, (1977) 7-8

68. ZWR-REVUE: Kunststoffe für die zahnärztliche Versorgung. Zahnärztl.Welt 91, (1982) 20-23

Anhang

I. Materialien und Instrumente

Produkte	Hersteller
Ätz-Gel	ESPE, Fabrik pharmazeutischer Präparate GmbH, D - 8031 Seefeld/Oberbayern
AGFA-ORTHO 25® Professional, Dokumentenfilm	Agfa-Gevaert, D - 5090 Leverkusen 1
Ahorn-Interdentalkeile, 13 mm superfein	Hawe-Neos Dental, CH - 6925 Gentilino-Lugano
Arkansas-Steinchen: Flamme Fig. 661, ISO 030 (für Winkelstück), Kugel Fig. 601, ISO 030 (für Winkelstück)	Busch & Co., Postfach 1152, D - 5250 Engelskirchen
Caulk Auto-Matrix®, Matrizensystem ohne Halter, 4 Größen	L. D. Caulk Co., Milford, Delaware 19965, USA
CELLURON®-Zahnwatterollen	Paul Hartmann AG, D - 7920 Heidenheim/Brenz
CHLORHEXAMED®	Blend-a-med-Forschung Blendax, D - 6500 Mainz
COLORPLAN CF®, Objektiv 2,5/90 mm	Carl Zeiss, D - 7082 Oberkochen
DePeX®, Einschlußmittel für Histologie, neutrale Lösung von Polystyrol mit Weichmacher in Xylol	Serva, Feinbiochemica, D - 6900 Heidelberg

Diamantierte Schleifkörper für Turbine: Walze 835/012, 836/014, U-Kegel 807/014, Flamme 862/014 (Feinkorn)	D + Z, Goerzallen 307, D - 1000 Berlin 37
Diamantierte Schleifkörper für Winkelstück: Flamme 862/016, 862/014 (fein), kleine Flamme 860/010, 860/009 (fein), Kugel 801/012 (fein)	D + Z, Goerzallen 307, D - 1000 Berlin 37
Diaprojektor PRADO® mit Objektiv 1:2,5/150 mm, Typ Hektor	Ernst Leitz GmbH, Hausertorwerk, D - 6330 Wetzlar
Diaprojektor PRADOVIT®	Carl Zeiss, D - 7082 Oberkochen
Digital-INKREMENTALER Längenzähler, Fabrikat Heidenhain	Dr. Johannes Heidenhain, D - 8225 Traunreut
Dokumol®	Tetenal Photowerk, Postfach 2029, D - 2000 Norderstedt
Einmalpinsel	Vivadent, FL - 4444 Schaan/Liechtenstein
ELMEX FLUID®	Wybert GmbH, D - 7800 Lörrach
ES-Kompressen 10 x 10 cm	Paul Hartmann AG, D - 7920 Heidenheim/Brenz
ESTIC MICROFILL®	Kulzer & Co. GmbH, Frölingstr. 29, D - 6380 Bad Homburg

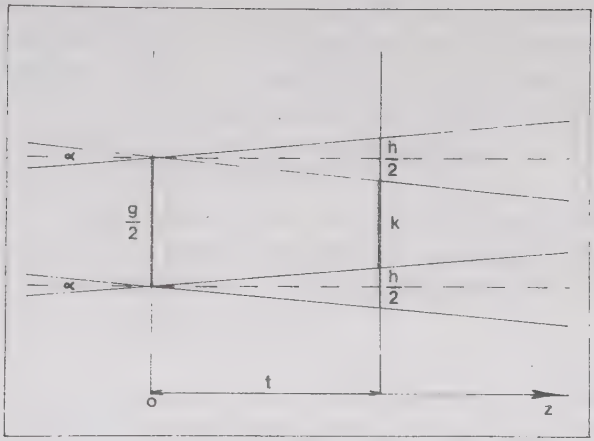
"Gerade Linien", Linienraster, 50 %-lin. 27,5 Nr. 03299	ALFAC Novotypie, Rue de l'Industrie 12, B - 1400 Nivelles
"Gerade Linien", siebenfache Verkleinerung der Originalvorlage auf linientreuen Film	Graphische Kunstanstalt, Erich Maurer, Kelterstr. 16, D - 7400 Tübingen
Haftlack-Silispray®	Dentax-Dental, Karl Huber KG, D - 7500 Karlsruhe
Halbe Abdrucklöffel, perforiert, DR 721, DR 724, DR 731, DR 734	Aeskulap-Werke AG, D - 7200 Tuttlingen
HARVARD®-Zement normalhärtend, Farbe Nr. 3, Pulver und Flüssigkeit	Richter und Hoffmann, Harvard Dental-Gesellschaft, D - 1000 Berlin
INTRA-matic®, Winkelstück 20 A, INTRA-Kopf 68 C	Kaltenbach und Voigt, D - 7950 Biberach
ISO V (Isomolar) (Testmaterial)	Vivadent, FL - 4444 Schaan/ Liechtenstein
KAVO ALL AIR®, Turbine	Kaltenbach und Voigt, D - 7950 Biberach
KERR Impression Compound® Stangengrün 60064	Kerr GmbH, Postfach 410540, D - 7500 Karlsruhe 41
Leinenstreifen (Linen Finishing Strips)	Moyco Industries INC, Philadelphia, PA 19132, USA
Mandrel Mounted Rubber Polishing Cups	Produits Detaires, S.A. Vevey, Suisse

MIRANDA®, Kleinbildkamera	AIC-Fototechnik GmbH, Schulze-Delitzsch-Str. 7, D - 7022 Leinfelden/Echterdingen
NIMETIC®, Composite Polierpaste	ESPE, Fabrik pharmazeutischer Präparate GmbH, D - 8031 Seefeld/Oberbayern
NOVOFLEX®, Objektiv Macro 105	NOVOFLEX FOTOGERÄTEBAU, Donaustr. 78, D - 8940 Memmingen
Okklusionsprüffolie (schwarz und rot), einseitig, 22mm x 80mm	GHM-Hanel-Medizinal, D - 7440 Nürtingen
Parallelometer	Degussa AG, Postfach 420, 7530 Pforzheim
Polykarbonatfolie, Frasaco-Universalstreifen, extra dünn	Franz Sachs & Co., D - 7992 Tettnang
REOCAP®	Vivadent, FL - 4444 Schaan/Liechtenstein
Shimstock-Folie (Rettungsdecke ADAC)	Angaben fehlen
SILAPLAST® und SILASOFT®	Dentax Dental, Karl Huber KG, D - 7500 Karlsruhe
Silikonpolierer: Flamme, Kelch und Linse	Vivadent, FL - 4444 Schaan/Liechtenstein
Universal-Meßmikroskop	Carl Zeiss, D - 7082 Oberkochen

Uvio-Fill®	ESPE, Fabrik pharmazeutischer Präparate GmbH, D - 8031 Seefeld/Oberbayern
VELMIXSTONE®, Modellgips extra hart, rosa	KERR GmbH, Postfach 410540, D - 7500 Karlsruhe
Zahnreinigungsbürstchen, Kelche	Polirapid Dr. Montemerlo & Co., Hardenbergstr. 18, P.O.Box 309, D - 7700 Singen

II. Mathematische Abhandlung

Einfluß der Beleuchtungsapertur α



In Abhängigkeit von z gilt für den Kernschatten k:
$k(z) = g/2 - h(z)/2$. Für kleine Winkel α gilt $h/2 = \alpha \cdot z$
daraus folgt: $k(z) = g/2 - \alpha \cdot z$

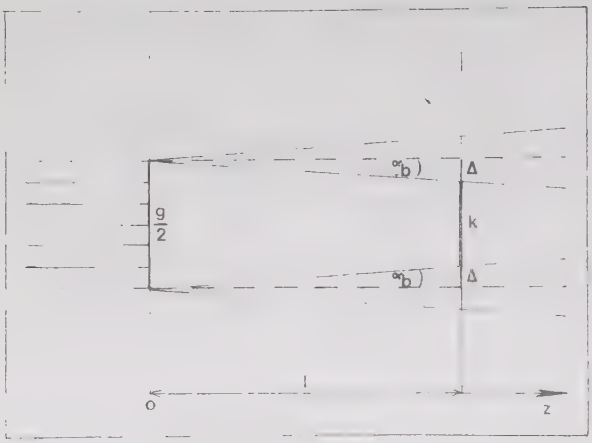
Das Verhältnis $\kappa = k(z)/h(z)$ ist dann $\kappa = \frac{g/2 - \alpha \cdot z}{2 \cdot \alpha \cdot z}$

und es gilt $(2\kappa + 1) \cdot z \cdot \alpha = g/2$

Damit ein kontrastreicher Gitterschatten entsteht, darf κ nicht zu klein werden. Eine willkürliche aber sinnvolle Forderung ist $\kappa \geq 1$. Dies bedeutet anschaulich, daß der Kernschatten $k \geq 2/3$ von g/2 bleibt.
Benötigt man für die Messung einen nutzbaren Tiefenbereich $z_{max} = t$, so erhält man für die Gitterkonstante g die Bedingung $g \geq 2\ (2\kappa+1) \cdot t \cdot \alpha$; also $g \geq 6 \cdot t \cdot \alpha$

Bei der vorliegenden Arbeit betrug t = 3 mm, α = 6,6 mrad; dementsprechend sind für g Werte größer oder gleich 120 µm gefordert.

Einfluß der Beugung am Gitter



Durch die Beugung des Lichtes um den Winkel $\alpha_b = \lambda/g$ wird der Kernschatten k in einem Randbereich $\Delta = \alpha_b \cdot z$ aufgehellt und verschmälert. In Abhängigkeit von z erhält man die Kernschattenbreite: $k(z) = g/2 - 2\cdot\Delta$; $k(z) = g/2 - 2\cdot\alpha_b \cdot z$

Bildet man das Verhältnis von Kernschatten zu Halbschatten $\gamma = k(z)/2\Delta = \frac{g/2 - 2\alpha_b z}{2\alpha_b z}$ so folgt für g/2:

$g/2 = 2(\alpha_b \cdot z)\cdot\gamma + 2\alpha_b \cdot z$ und daraus ergibt sich (wegen $\alpha_b = \lambda/g$) $g = \sqrt{4(\gamma+1)\cdot\lambda\cdot z}$

Wird wie oben gefordert, daß der Kernschatten $k \geq 2/3$ von g/2 ist (entsprechend $\gamma = 2$), erhält man für die Gitterkonstante g die Bedingung $g \geq \sqrt{12\cdot\lambda\cdot l}$, bei $z_{max} = l$

Für eine mittlere Wellenlänge $\lambda = 500$ nm und $l = 3$ mm ergibt sich eine Gitterkonstante, die größer oder gleich 130 µm ist.

Danksagung

Herrn Professor Dr. Dr. P. Riethe möchte ich an dieser Stelle meinen herzlichsten Dank aussprechen für die freundliche Überlassung des Themas und die allgegenwärtige großzügige Unterstützung bei der Durchführung der Arbeit. Seine fast väterliche Führung trug maßgeblich zum Gelingen bei.

Mein Dank gilt ebenso Herrn Professor Dr. H. Haselmann und Herrn Professor Dr. F. Habermalz vom Institut für wissenschaftliche Mikroskopie der Universität Tübingen für wertvolle wissenschaftliche Ratschläge.

Herrn Dr. H. Lichte vom Physikalischen Institut der Universität Tübingen gebührt besonderer Dank für seine tatkräftige Anleitung auf dem physikalischen Sektor.

Besten Dank Herrn G. Schubring vom Zentrum für Datenverarbeitung der Universität Tübingen, dessen Mitarbeit bei der statistischen Auswertung von größter Wichtigkeit war.

Vielen Dank für spezielle Anregungen sei Herrn Dr. W. Lindemann und Herrn Dipl. Phys. D. Lukas gesagt.

Ein Dankeschön verdienen genauso Frl. R. Beth, Frl. M. Retig, Frl. U. Meckes, Herr Stopper und Herr Künstle für detailierte technische Hilfe.

Für meinen Freund Hartmut Rein wäre ein Dankeschön zu wenig. Seine ermutigende Gegenwart und sein anspornender Beistand halfen mir erst, die größten Schwierigkeiten zu überwinden.

LEBENSLAUF

Roland Meint

Geboren am 09.12.1954 in Hermannstadt (Sibiu), Rumänien

1961-1969	Besuch der Grund- und Mittelschule in Hermannstadt
1969-1970	Bruckenthal-Gymnasium, Hermannstadt
1970-1975	Schelztor-Gymnasium, Esslingen a. N.
16.05.1975	Reifezeugnis
1975-1980	Studium der Zahnmedizin an der Eberhard-Karls-Universität, Tübingen
21.03.1978	Zahnärztliche Vorprüfung
15.12.1980	Staatsexamen
29.12.1980	Zahnärztliche Approbation
1981	Assistenz-Zahnarzt an der AOK-Zahnklinik, Reutlingen
1981-1983	Stabsarzt bei der Deutschen Bundeswehr (Wehrdienst als Soldat auf Zeit)
09.04.1970	Übersiedlung mit den Eltern in die Bundesrepublik und Annahme der deutschen Staatsangehörigkeit (die Einbürgerung erfolgte 1980).
29.08.1980	Standesamtliche Eheschließung mit Ute Gottwald in Esslingen a. N.
05.03.1981	Geburt unseres Sohnes Tobias

Offsetdruck Spengler
Lessingstraße 4 · 7401 Neustetten 1
Telefon (0 74 72) 2 21 45